ENGENHARIA, GESTÃO E INOVAÇÃO

ORGANIZADORES
ALINE MARA OLIVEIRA
OSVALDO SENA GUIMARÃES

VOLUME 26

Editora Poisson

Aline Mara Oliveira
Osvaldo Sena Guimarães
(Organizadores)

Engenharia, Gestão e Inovação
Volume 26

1ª Edição

Belo Horizonte
Editora Poisson
2026

Editor Chefe: Dr. Darly Fernando Andrade

Conselho Editorial
Dr. Antônio Artur de Souza – Universidade Federal de Minas Gerais
MSc. Davilson Eduardo Andrade
Dra. Elizângela de Jesus Oliveira – Universidade Federal do Amazonas
MSc. Fabiane dos Santos
Dr. José Eduardo Ferreira Lopes – Universidade Federal de Uberlândia
Dr. Otaviano Francisco Neves – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais
Dr. Luiz Cláudio de Lima – Universidade FUMEC
Dr. Nelson Ferreira Filho – Faculdades Kennedy
MSc. Valdiney Alves de Oliveira – Universidade Federal de Uberlândia

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

O482e
Engenharia, Gestão e Inovação – Volume 26 / Organização: Aline Mara Oliveira, Osvaldo Sena Guimarães – Belo Horizonte MG: Editora Poisson, 2026. 170 p.

Formato: PDF
ISBN: 978-65-5866-683-7
DOI: 10.36229/978-65-5866-683-7
Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia

1. Engenharia 2. Gestão 3. Inovação. 1. OLIVEIRA, Aline Mara 2. GUIMARÃES, Osvaldo Sena 3. Título

CDD-620

SÔNIA MÁRCIA SOARES DE MOURA – CRB 6/1896

O conteúdo deste livro está licenciado sob a Licença de Atribuição Creative Commons 4.0.
Com ela é permitido compartilhar o livro, devendo ser dado o devido crédito, não podendo ser utilizado para fins comerciais e nem ser alterado.

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos seus respectivos autores.

Esse e outros títulos podem ser baixados gratuitamente em www.poisson.com.br
Entre em contato pelo contato@poisson.com.br

SUMÁRIO

Capítulo 1: Entre o tecnicismo e a formação crítica: epistemologia e metodologia científica na engenharia 06

Raquel Quirino

DOI: 10.36229/978-65-5866-683-7.CAP.01

Capítulo 2: Desafios da utilização de ferramentas de inteligência artificial no processo de aprendizagem de estudantes de engenharia: uma análise crítica à luz da facilitação do acesso ao conhecimento..... 18

Alan Marques da Rocha, Ruann Campos de Castro Farrapo, Thales Guimarães Marques

DOI: 10.36229/978-65-5866-683-7.CAP.02

Capítulo 3: Estratégias para estudo do processo de fratura no ensaio de dureza vickers em materiais compostos através do MEF 27

Victor Campos Rodrigues Pinheiro, Avelino Manuel da Silva Dias, Fabio Dalmazzo Sanches

DOI: 10.36229/978-65-5866-683-7.CAP.03

Capítulo 4: Desenvolvimento e caracterização de briquetes lignocelulósicos produzidos por batelada hermética utilizando resíduos alimentícios como aglutinantes..... 43

Leoncio Diogenes Tavares Camara, Philipe Lopes Jurge Tardin, Felipe Bicalho Azeredo da Silva

DOI: 10.36229/978-65-5866-683-7.CAP.04

Capítulo 5: Desidratação de abóbora (Cucurbita spp.) por diferentes métodos de secagem: uma síntese comparativa tecnológica para a produção de snacks 55

Durval Guedes dos Santos Neto, Everton Pereira Fernandes, Denisdelkian Souza Diniz, Agahilton Oliveira de Souza Júnior, Jônatas Gabriel Santos Raiff de Araujo, Antônio Diógenes Texeira de Azevedo, Joselma Araújo de Amorim, Anoar Abbas El-Aouar, Geraldo Dantas Silvestre, Josevan da Silva, Pierre Corrêa Martins

DOI: 10.36229/978-65-5866-683-7.CAP.05

Capítulo 6: Analysis of pollution at nine points along the Paraíba do Sul river using multivariate statistical techniques..... 80

Nilo Antonio de Souza Sampaio, Adir Faturi Filho, Hugo Pimentel Tavares

DOI: 10.36229/978-65-5866-683-7.CAP.06

Capítulo 7: Nitrogen control in a water body using complete factorial planning.. 92

Nilo Antonio de Souza Sampaio, Gabriela Goes Mercedes, Hugo Pimentel Tavares

DOI: 10.36229/978-65-5866-683-7.CAP.07

Capítulo 8: Applications of factor analysis and response surface methodology in chemical process optimization problems..... 101

Nilo Antonio de Souza Sampaio, Yúrika Wakigama Damaceno, Hugo Pimentel Tavares

DOI: 10.36229/978-65-5866-683-7.CAP.08

SUMÁRIO

Capítulo 9: Using Taguchi's experiments part III: choosing raw materials according to process yields 114

Nilo Antonio de Souza Sampaio, Rômulo Ivan Couto Manso, Hugo Pimentel Tavares, André Cremonez Soares Moebus

DOI: 10.36229/978-65-5866-683-7.CAP.09

Capítulo 10: Using the paired T-Test to compare suppliers in a company 123

Nilo Antonio de Souza Sampaio, Luana Ellen da Silva Santos, Hugo Pimentel Tavares

DOI: 10.36229/978-65-5866-683-7.CAP.10

Capítulo 11: Using the attribute control chart to monitor a chemical manufacturing process 135

Nilo Antonio de Souza Sampaio, Claudio Tavares, Hugo Pimentel Tavares

DOI: 10.36229/978-65-5866-683-7.CAP.11

Capítulo 12: FotoBiocarregadores Elétricos (FBCE): uma abordagem interdisciplinar entre bioeconomia circular e infraestrutura urbana inteligente 143

Berenice de Oliveira Bona, Leandro de Oliveira, Adriano Daniel Müller, Leandro Ricardo de Moraes Arisi, Tiago Henrique Bona, Matheus Bona

DOI: 10.36229/978-65-5866-683-7.CAP.12

Capítulo 13: A logística como diferencial competitivo na cadeia de suprimentos da Zona Franca de Manaus 150

Rayssa Valente Simão, Giskele Luz Rafael

DOI: 10.36229/978-65-5866-683-7.CAP.13

Capítulo 14: Mapeamento do fluxo de valor como ferramenta estratégica de melhoria contínua 157

Henrique Guizellini Pinto, Felipe Segateli Irikawa, Daniel Mantovani, Juliana Verga Shirabayashi, Marco Aurélio Reis dos Santos, Rafael Germano Dal Molin Filho

DOI: 10.36229/978-65-5866-683-7.CAP.14

Autores 167

Capítulo 1

Entre o tecnicismo e a formação crítica: epistemologia e metodologia científica na engenharia

Raquel Quirino

Resumo: Este artigo analisa os pressupostos epistemológicos e pedagógicos que orientam o ensino de Metodologia Científica nos cursos de engenharia, problematizando as tensões entre racionalidade tecnicista, academicismo abstrato e formação crítica. Parte-se da compreensão de que a pesquisa científica na engenharia não pode ser reduzida ao domínio instrumental de normas e procedimentos, nem dissociada das dimensões sociais, éticas e políticas que atravessam a produção tecnológica. Trata-se de um estudo de abordagem qualitativa, de natureza exploratória e caráter teórico-analítico, fundamentado em revisão bibliográfica sobre epistemologia da ciência, ciência do artificial, epistemologia do design e estudos Ciência, Tecnologia e Sociedade (CTS). A análise evidencia que o ensino de Metodologia Científica frequentemente oscila entre perspectivas excessivamente abstratas e abordagens procedimentais que esvaziam o potencial formativo da investigação científica. Discute-se, nesse contexto, a necessidade de reposicionar a disciplina como espaço de iniciação científica, integração entre teoria e prática e desenvolvimento de uma formação socialmente comprometida. As reflexões desenvolvidas apontam que a engenharia deve ser compreendida não apenas como campo de aplicação técnica, mas como área produtora de conhecimento, atravessada por escolhas epistemológicas, implicações éticas e responsabilidades sociais. Conclui-se que fortalecer a formação científica na engenharia exige superar modelos educacionais centrados exclusivamente na eficiência instrumental, promovendo práticas investigativas capazes de articular rigor conceitual, pensamento crítico e compromisso social.

Palavras-chave: Formação científica. Engenharia. Epistemologia. Ciência, Tecnologia e Sociedade. Metodologia Científica.

1. INTRODUÇÃO

A formação em engenharia ocupa posição estratégica nas sociedades contemporâneas, especialmente em contextos marcados pela centralidade da ciência, da tecnologia e da inovação nos processos produtivos e nas dinâmicas sociais. Mais do que formar profissionais aptos a desenvolver soluções técnicas, os cursos de engenharia são chamados a preparar sujeitos capazes de compreender criticamente os impactos econômicos, sociais, ambientais e éticos de sua atuação. Tal exigência torna-se ainda mais relevante em um cenário caracterizado pela intensificação das transformações tecnológicas e pela crescente interdependência entre desenvolvimento científico, produção industrial e organização da vida social (Bazzo, 2014).

No Brasil, a educação superior possui entre suas finalidades não apenas a qualificação profissional, mas também o estímulo à produção científica, à reflexão crítica e à formação intelectual dos estudantes, conforme estabelece a Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional (Brasil, 1996). Essa compreensão pressupõe reconhecer a universidade como espaço de socialização epistêmica e de inserção na cultura científica, superando perspectivas estritamente profissionalizantes. Entretanto, nos cursos de engenharia, essa dimensão formativa frequentemente entra em tensão com modelos educacionais fortemente orientados pela racionalidade técnica e pela lógica da eficiência instrumental.

Ao discutir a modernidade técnico-científica, Habermas (1987) observa que a racionalidade instrumental tende a converter os processos formativos em mecanismos voltados prioritariamente à operacionalização de meios, reduzindo o espaço destinado à reflexão crítica acerca dos fins sociais da ação humana. No campo da engenharia, essa lógica manifesta-se na valorização quase exclusiva da aplicabilidade imediata do conhecimento, da resolução pragmática de problemas e da produtividade técnica, frequentemente em detrimento da problematização epistemológica, ética e social da atividade científica e tecnológica.

É nesse contexto que a disciplina de Metodologia Científica assume relevância estratégica na formação em engenharia. Tradicionalmente presente nos currículos de graduação, ela constitui um dos principais espaços institucionais voltados à introdução dos estudantes nos fundamentos da pesquisa acadêmica e da produção do conhecimento. Contudo, sua presença nos cursos de engenharia tem sido marcada por ambiguidades pedagógicas e epistemológicas que limitam seu potencial formativo.

Em muitos casos, observa-se a oscilação entre dois polos igualmente problemáticos. De um lado, abordagens excessivamente abstratas, centradas em discussões filosóficas pouco articuladas às experiências concretas dos estudantes e às especificidades da engenharia. De outro, práticas pedagógicas tecnicistas que reduzem a pesquisa científica ao domínio de normas da ABNT, procedimentos metodológicos e exigências burocráticas associadas à elaboração do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC). Conforme alertam Bazzo, Linsingen e Pereira (2003), tal redução empobrece a compreensão da ciência e contribui para reforçar visões instrumentais da formação tecnológica.

Como consequência, a pesquisa tende a ser percebida pelos estudantes ora como exercício excessivamente abstrato e distante da prática profissional, ora como formalidade acadêmica desprovida de significado investigativo. Nessa perspectiva, o TCC frequentemente converte-se em produto burocrático voltado apenas ao cumprimento de exigências curriculares, esvaziando seu potencial como experiência de iniciação científica e produção de conhecimento. Tal cenário reforça aquilo que Demo (2000) denomina

“pesquisa como princípio apenas formal”, em que a atividade investigativa perde sua dimensão crítica e emancipatória.

Essa problemática torna-se particularmente significativa no campo da engenharia, historicamente marcado pela valorização da objetividade técnica e pela centralidade da solução prática de problemas. Embora essas características sejam constitutivas da área, sua absolutização pode favorecer formas de empirismo ingênuo, nas quais a prática experimental é dissociada da reflexão teórica e epistemológica. Como observa Bunge (1987), não existe observação neutra ou produção de conhecimento desvinculada de referenciais conceituais; toda investigação científica é orientada por pressupostos teóricos que condicionam a formulação de problemas, a escolha de métodos e a interpretação dos resultados.

As contribuições da epistemologia da ciência oferecem importantes elementos para compreender essa complexidade. Popper (1980) destaca o caráter provisório e conjectural do conhecimento científico, enquanto Kuhn (2006) demonstra que a ciência se desenvolve em meio a disputas paradigmáticas e rupturas históricas. Lakatos (1999), por sua vez, enfatiza o caráter heurístico e progressivo dos programas de pesquisa, ao passo que Feyerabend (1977) questiona a existência de métodos científicos universais e rígidos. Em conjunto, essas perspectivas permitem compreender que a ciência não constitui sequência linear e neutra de procedimentos, mas prática histórica, interpretativa e socialmente situada.

No âmbito específico da engenharia, as contribuições de Herbert Simon (1996) acerca da ciência do artificial ampliam essa discussão ao compreender a engenharia como campo voltado não apenas à descrição do mundo, mas à criação de artefatos, sistemas e soluções orientadas por finalidades humanas. De modo complementar, os estudos sobre epistemologia do design (Cross, 2007; Schön, 2000) evidenciam que o ato de projetar envolve processos cognitivos complexos, nos quais investigar, criar e resolver problemas constituem dimensões inseparáveis. Projetar, nesse sentido, é também produzir conhecimento.

Somam-se a esse debate os estudos em Ciência, Tecnologia e Sociedade (CTS), particularmente as contribuições de Bazzo (2014) e Bazzo, Linsingen e Pereira (2003), que problematizam a suposta neutralidade da ciência e da tecnologia, evidenciando os condicionamentos sociais, políticos e éticos presentes nos processos de inovação. Sob essa perspectiva, a formação científica na engenharia não pode restringir-se ao domínio técnico, devendo incorporar reflexões acerca das consequências sociais das escolhas tecnológicas, da sustentabilidade e da responsabilidade pública do engenheiro.

Diante dessas considerações, este artigo busca analisar os pressupostos epistemológicos e pedagógicos que orientam o ensino de Metodologia Científica nos cursos de engenharia, problematizando as tensões entre tecnicismo, academicismo e formação crítica. Busca-se, ainda, discutir possibilidades de reposicionamento da disciplina como espaço de iniciação científica, integração entre teoria e prática e desenvolvimento de uma formação profissional socialmente comprometida, contribuindo para a humanização da formação em engenharia. Para isso, mobilizam-se contribuições da epistemologia da ciência, da ciência do artificial, da epistemologia do design e dos estudos CTS, em diálogo com reflexões sobre educação superior e produção do conhecimento tecnológico (Bazzo, 2014).

Trata-se de um estudo de abordagem qualitativa, de natureza exploratória e caráter teórico-analítico, desenvolvido a partir de levantamento bibliográfico em obras clássicas

da epistemologia da ciência, da ciência do artificial, da epistemologia do design e dos estudos CTS. A análise fundamenta-se na interlocução entre autores como Popper, Kuhn, Lakatos, Feyerabend, Simon, Cross, Schön e Bazzo, buscando compreender os dilemas epistemológicos e pedagógicos que atravessam o ensino de Metodologia Científica na engenharia e suas implicações para a formação científica e humana dos estudantes.

2. ENTRE O TECNICISMO E A FORMAÇÃO CRÍTICA: EPISTEMOLOGIA E ENSINO DE ENGENHARIA

A discussão acerca da formação científica na engenharia exige reconhecer que o ensino tecnológico não é neutro, tampouco se limita à transmissão de conteúdos técnicos e operacionais. A própria definição do que conta como conhecimento válido, dos métodos considerados legítimos e das formas de resolução de problemas está associada a determinadas concepções epistemológicas e a projetos históricos de formação profissional. Nesse sentido, refletir sobre o ensino de Metodologia Científica implica discutir os fundamentos que sustentam a produção do conhecimento científico e tecnológico e os modos como esses fundamentos são apropriados no contexto da engenharia.

Historicamente, parte significativa dos currículos das engenharias foi estruturada sob forte influência do positivismo e da racionalidade técnico-instrumental, privilegiando modelos lineares de ciência, objetividade e neutralidade tecnológica (Bazzo, 2014). Essa tradição contribuiu para consolidar a ideia de que o conhecimento científico resulta da aplicação rigorosa de métodos universais, capazes de conduzir a verdades estáveis e verificáveis. No plano pedagógico, tal concepção frequentemente se traduz na redução do método científico a uma sequência padronizada de etapas: observação, formulação de hipóteses, experimentação e conclusão, apresentada como percurso neutro e universal da investigação.

Entretanto, as contribuições contemporâneas da epistemologia da ciência demonstram que a produção do conhecimento é processo significativamente mais complexo, histórico e controverso. Ao criticar o indutivismo clássico, Popper (1980) argumenta que a ciência não avança por simples acumulação de fatos observáveis, mas por meio de conjecturas e refutações. Para o autor, o conhecimento científico é necessariamente provisório, estando permanentemente sujeito à crítica e à possibilidade de falseamento. Nessa perspectiva, a ciência não produz verdades definitivas, mas explicações temporariamente aceitas pela comunidade científica.

Kuhn (2006), por sua vez, amplia essa problematização ao demonstrar que a ciência se desenvolve em meio a disputas paradigmáticas e rupturas históricas. Segundo o autor, os paradigmas científicos orientam não apenas os métodos de investigação, mas também a própria definição dos problemas considerados relevantes e das soluções socialmente legitimadas. A ciência, portanto, não constitui atividade cumulativa e linear, mas processo marcado por crises, disputas interpretativas e transformações conceituais profundas. Tal compreensão é particularmente importante para a engenharia, uma vez que as mudanças tecnológicas frequentemente decorrem de alterações paradigmáticas que redefinem práticas produtivas, modelos de desenvolvimento e formas de organização social.

Na mesma direção, Lakatos (1999) propõe a noção de programas de pesquisa, ressaltando que a ciência se organiza em torno de núcleos teóricos relativamente estáveis, protegidos por hipóteses auxiliares que permitem a continuidade da investigação mesmo diante de

anomalias empíricas. Diferentemente da ideia de método rígido e universal, a produção científica passa a ser compreendida como empreendimento coletivo, dinâmico e heurístico, no qual teoria e prática se articulam continuamente. Feyerabend (1977), ao radicalizar essa crítica, questiona a existência de regras metodológicas universais e defende um pluralismo epistemológico baseado na diversidade de estratégias investigativas.

Essas contribuições tornam evidente que o ensino de Metodologia Científica não pode restringir-se à apresentação normativa de técnicas e procedimentos de pesquisa. Quando reduzida a um conjunto de regras formais, a disciplina tende a reforçar formas de empirismo ingênuo, nas quais a atividade científica é percebida apenas como aplicação mecânica de métodos previamente estabelecidos. Conforme observa Bunge (1987), toda observação científica é teoricamente orientada; não existem fatos “puros” desvinculados de referenciais conceituais. Assim, a escolha de objetos, métodos e interpretações depende de pressupostos epistemológicos que precisam ser explicitados e problematizados no processo formativo.

No contexto da engenharia, essa limitação manifesta-se frequentemente na dissociação entre prática técnica e reflexão teórica. Muitos estudantes desenvolvem projetos, protótipos e experimentações sem compreender plenamente que tais atividades também constituem formas de investigação científica. Em consequência, os Trabalhos de Conclusão de Curso acabam assumindo caráter predominantemente descritivo ou operacional, limitando-se à apresentação de procedimentos técnicos, resultados empíricos e aplicações instrumentais, sem explicitar os fundamentos conceituais que orientam a pesquisa.

Essa tendência é reforçada por uma cultura acadêmica marcada pelo produtivismo e pela burocratização da pesquisa universitária. Como observa Demo (2000), a pesquisa perde parte de sua dimensão formativa quando passa a ser tratada apenas como exigência curricular ou requisito institucional. Nesses casos, a elaboração do TCC transforma-se em atividade voltada prioritariamente ao cumprimento de normas formais e prazos administrativos, esvaziando seu potencial como experiência de problematização crítica da realidade e de produção de conhecimento socialmente relevante.

Ao mesmo tempo, também se mostram problemáticas as abordagens excessivamente abstratas da Metodologia Científica, centradas em debates filosóficos dissociados das práticas concretas da engenharia. Embora a reflexão epistemológica seja fundamental para a compreensão crítica da ciência, sua apresentação descontextualizada pode gerar distanciamento e desinteresse entre estudantes fortemente influenciados pela cultura pragmática das engenharias. Conforme argumenta Schön (2000), os processos formativos tornam-se mais significativos quando articulam reflexão e experiência prática, permitindo que o sujeito compreenda o conhecimento no próprio ato de intervir sobre problemas reais.

Nesse sentido, o desafio pedagógico consiste em superar a falsa oposição entre teoria e prática que historicamente atravessa a formação em engenharia. A epistemologia não deve ser compreendida como abstração filosófica distante da atividade técnica, mas como instrumento capaz de orientar criticamente a formulação de problemas, a construção de hipóteses, a escolha de métodos e a interpretação dos resultados. Da mesma forma, a prática experimental não pode ser reduzida ao domínio operacional de técnicas, pois toda intervenção tecnológica envolve pressupostos científicos, escolhas sociais e implicações éticas.

Essa compreensão exige reposicionar a Metodologia Científica como espaço de formação intelectual e investigativa, e não apenas como disciplina instrumental voltada ao ensino de normas acadêmicas. Mais do que aprender procedimentos técnicos, o estudante de engenharia precisa compreender a ciência como prática histórica, social e interpretativa, reconhecendo que a produção do conhecimento tecnológico envolve criatividade, tomada de decisão, disputas paradigmáticas e responsabilidade social. Tal perspectiva abre caminho para compreender a engenharia não apenas como aplicação da ciência, mas como campo produtor de conhecimento, discussão que se torna ainda mais evidente nas contribuições da ciência do artificial e da epistemologia do design (Simon, 1996; Cross, 2007).

3. ENGENHARIA, DESIGN E PRODUÇÃO DO CONHECIMENTO

A compreensão da engenharia como campo produtor de conhecimento exige superar a concepção tradicional que a reduz à mera aplicação prática de teorias científicas previamente consolidadas. Durante longo período, predominou a ideia de que as engenharias ocupavam posição secundária em relação às chamadas ciências puras, limitando-se à operacionalização técnica de descobertas produzidas em outros campos do saber. Entretanto, autores vinculados à epistemologia do design e à ciência do artificial demonstram que a atividade projetual possui natureza cognitiva própria, envolvendo processos investigativos, criativos e heurísticos que também produzem conhecimento científico e tecnológico (Simon, 1996; Cross, 2007).

Nesse debate, a contribuição de Herbert Simon (1996) ocupa posição central. Ao formular a noção de ciência do artificial, o autor propõe deslocamento epistemológico importante ao afirmar que áreas como engenharia, arquitetura, medicina e administração não se ocupam apenas da compreensão do mundo natural, mas da criação de artefatos, sistemas e soluções orientadas por finalidades humanas. Diferentemente das ciências naturais, cuja preocupação central reside em explicar “como as coisas são”, as ciências do artificial voltam-se para “como as coisas podem vir a ser” (Simon, 1996). A engenharia, nesse sentido, não constitui simples aplicação da ciência, mas prática de síntese, invenção e produção de possibilidades.

Essa perspectiva rompe com a hierarquia tradicional entre ciência teórica e prática tecnológica, reconhecendo que o ato de projetar envolve formulação de problemas, elaboração de hipóteses, experimentação e validação de soluções. Projetar, portanto, é também investigar. O engenheiro não apenas executa procedimentos técnicos, mas constrói modelos interpretativos, testa alternativas e produz conhecimentos novos a partir da interação entre teoria, experiência e contexto social. Como observa Simon (1996), a racionalidade projetual caracteriza-se pela busca de soluções satisfatórias diante de problemas complexos e contingentes, exigindo processos contínuos de decisão, adaptação e aprendizagem.

A epistemologia do design aprofunda essa compreensão ao reconhecer o design como forma específica de conhecimento. Cross (2007) argumenta que o pensamento projetual constitui modalidade cognitiva distinta das formas tradicionais de raciocínio científico dedutivo e indutivo, operando frequentemente por meio da abdução, isto é, da formulação criativa de hipóteses e possibilidades. Nesse processo, a construção de protótipos, modelos e simulações não representa apenas etapa operacional do trabalho técnico, mas mecanismo de reflexão e produção de conhecimento.

Ao discutir as "*designerly ways of knowing*", Cross (2007) sustenta que o design mobiliza competências intelectuais específicas relacionadas à resolução de problemas mal definidos, nos quais os objetivos e critérios de solução nem sempre estão previamente estabelecidos. Essa característica aproxima fortemente a atividade projetual da pesquisa científica, sobretudo em contextos de inovação tecnológica, nos quais o engenheiro precisa lidar com incertezas, variáveis complexas e demandas sociais em constante transformação.

Schön (2000), ao desenvolver a noção de profissional reflexivo, contribui igualmente para essa discussão ao demonstrar que o conhecimento profissional não se limita à aplicação mecânica de teorias formais. Segundo o autor, profissionais atuam em contextos marcados por singularidades, ambiguidades e conflitos de valores, exigindo capacidade de reflexão durante a própria ação. A prática profissional, nesse sentido, converte-se em espaço de investigação contínua, no qual o sujeito interpreta situações, reformula problemas e produz novos entendimentos a partir da experiência.

No contexto da formação em engenharia, essas contribuições possuem implicações pedagógicas significativas. Em primeiro lugar, elas permitem compreender que a produção de conhecimento tecnológico não pode ser reduzida à execução técnica de procedimentos previamente definidos. O desenvolvimento de projetos, protótipos e soluções exige processos investigativos complexos, nos quais teoria, criatividade e experimentação se articulam permanentemente. Assim, atividades tradicionalmente consideradas "práticas" também possuem densidade epistemológica e potencial científico.

Entretanto, essa dimensão investigativa frequentemente permanece invisibilizada no ensino de engenharia. Em muitos cursos, os estudantes são estimulados a desenvolver soluções técnicas sem explicitar os fundamentos conceituais que orientam suas escolhas metodológicas, seus critérios de validação e suas interpretações dos resultados. Como consequência, o trabalho projetual tende a assumir caráter predominantemente operacional, dificultando que os alunos reconheçam a si próprios como produtores de conhecimento. Tal cenário contribui para reforçar o empirismo ingênuo criticado por Bunge (1987), no qual a prática experimental aparece dissociada da elaboração teórica.

Essa limitação torna-se particularmente evidente na elaboração dos Trabalhos de Conclusão de Curso. Não raramente, os TCCs em engenharia concentram-se na descrição de processos técnicos, construção de protótipos ou apresentação de soluções aplicadas, sem estabelecer diálogo consistente com referenciais teóricos ou problematizar os pressupostos epistemológicos envolvidos na pesquisa. O resultado é a produção de trabalhos tecnicamente operacionais, mas conceitualmente frágeis, nos quais a investigação científica é reduzida à dimensão procedimental.

Nessa perspectiva, a disciplina de Metodologia Científica pode desempenhar papel fundamental na superação dessa fragmentação entre teoria e prática. Mais do que ensinar normas acadêmicas ou métodos padronizados, ela deve possibilitar que os estudantes compreendam o caráter investigativo do próprio processo projetual. Isso implica criar condições para que o aluno formule problemas de pesquisa, identifique lacunas teóricas, justifique escolhas metodológicas e reflita criticamente sobre os limites e impactos de suas soluções tecnológicas.

A aproximação entre epistemologia da ciência, ciência do artificial e epistemologia do design também permite ampliar a compreensão da inovação tecnológica. Inovar não significa apenas desenvolver artefatos eficientes do ponto de vista técnico, mas produzir

soluções socialmente significativas, sustentáveis e eticamente responsáveis. Como argumenta Van Aken (2004), o conhecimento produzido nas design sciences deve combinar utilidade prática e fundamentação científica, articulando rigor conceitual e relevância social.

Essa discussão torna-se particularmente relevante diante das transformações contemporâneas do mundo do trabalho e das crescentes demandas por inovação tecnológica socialmente comprometida. Em uma sociedade marcada por crises ambientais, desigualdades sociais e intensificação da automação, a formação do engenheiro não pode restringir-se ao domínio instrumental de técnicas e ferramentas. É necessário desenvolver capacidades investigativas, reflexivas e críticas que permitam compreender a tecnologia como fenômeno social e político.

Desse modo, compreender a engenharia como campo produtor de conhecimento implica reconhecer que projetar, pesquisar e inovar constituem processos inseparáveis. A atividade tecnológica deixa de ser percebida apenas como aplicação de saberes externos e passa a ser entendida como prática intelectual complexa, atravessada por escolhas epistemológicas, sociais e éticas. Essa compreensão conduz, inevitavelmente, à necessidade de discutir as relações entre ciência, tecnologia e responsabilidade social, tema central dos estudos CTS e das reflexões sobre formação crítica na engenharia (Simon, 1996; Cross, 2007).

4. CIÊNCIA, TECNOLOGIA E RESPONSABILIDADE SOCIAL NA FORMAÇÃO EM ENGENHARIA

As discussões acerca da formação científica na engenharia não podem restringir-se às dimensões epistemológicas e metodológicas da produção do conhecimento. A própria atividade tecnológica está inserida em relações sociais, econômicas, políticas e culturais que condicionam tanto os problemas considerados relevantes quanto as soluções técnicas produzidas. Nesse sentido, compreender a engenharia apenas como campo neutro de desenvolvimento tecnológico significa desconsiderar os impactos sociais das decisões técnicas e invisibilizar os interesses e valores que atravessam a produção científica e tecnológica (Bazzo, 2014).

Os estudos em CTS surgem precisamente como reação crítica às concepções tradicionais que tratavam ciência e tecnologia como esferas autônomas e desvinculadas das dinâmicas sociais. Segundo Bazzo, Linsingen e Pereira (2003), ciência e tecnologia constituem construções humanas historicamente situadas, permeadas por disputas de poder, interesses econômicos, condicionamentos culturais e implicações éticas. Nessa perspectiva, o desenvolvimento tecnológico não pode ser compreendido como processo linear e inevitável de progresso, mas como fenômeno socialmente produzido e politicamente orientado.

Essa abordagem possui implicações particularmente relevantes para a formação em engenharia. Historicamente, a educação tecnológica foi fortemente marcada por modelos formativos voltados à eficiência produtiva e à racionalidade instrumental, priorizando competências técnicas em detrimento da reflexão crítica sobre as consequências sociais da tecnologia. Como observa Habermas (1987), a expansão da racionalidade técnico-científica nas sociedades modernas tende a ampliar formas de controle instrumental do mundo, reduzindo os espaços de deliberação ética e política acerca das finalidades do desenvolvimento tecnológico.

No contexto da engenharia, essa lógica frequentemente se manifesta na naturalização da ideia de neutralidade técnica. Os artefatos tecnológicos passam a ser percebidos como soluções puramente objetivas, desvinculadas das relações sociais que os produzem e dos impactos que geram. Entretanto, conforme argumenta Winner (1986), toda tecnologia incorpora formas específicas de organização social, distribuição de poder e concepções de mundo. As escolhas técnicas realizadas durante o desenvolvimento de sistemas, máquinas e infraestruturas possuem consequências concretas sobre as condições de trabalho, o meio ambiente, os modos de vida e as formas de participação social.

Bazzo (2014) destaca que a formação do engenheiro não pode limitar-se à aprendizagem de conteúdos técnicos e científicos, devendo incluir também a compreensão crítica das relações entre tecnologia e sociedade. Para o autor, a educação tecnológica precisa favorecer o desenvolvimento de profissionais capazes de analisar os impactos éticos, ambientais e políticos de suas decisões, superando perspectivas reducionistas centradas exclusivamente na funcionalidade técnica dos artefatos.

Essa discussão torna-se ainda mais urgente diante das transformações contemporâneas associadas à automação, à inteligência artificial, à digitalização produtiva e às crises socioambientais globais. As inovações tecnológicas produzem efeitos que extrapolam amplamente o espaço técnico, interferindo nas relações de trabalho, nos processos de exclusão social, no consumo de recursos naturais e nas formas de organização da vida coletiva. Conforme argumenta Morin (2000), a fragmentação disciplinar e a hiperespecialização técnica dificultam a compreensão da complexidade dos problemas contemporâneos, tornando necessária uma formação capaz de integrar ciência, ética, política e responsabilidade social (Morin, 2000; Bazzo, 2014).

No âmbito da Metodologia Científica, essa perspectiva implica compreender que a pesquisa em engenharia não pode restringir-se à busca de eficiência operacional ou desempenho técnico. A formulação de problemas de pesquisa, a definição de critérios de validação e a implementação de soluções tecnológicas envolvem necessariamente escolhas valorativas e impactos sociais que precisam ser explicitados e debatidos durante o processo formativo. Assim, investigar não significa apenas responder “como fazer”, mas também problematizar “para que fazer”, “para quem fazer” e “quais consequências produzir”.

Entretanto, em muitos cursos de engenharia, essas dimensões permanecem secundarizadas. As práticas de pesquisa frequentemente privilegiam indicadores de desempenho técnico, inovação produtiva e viabilidade econômica, sem incorporar de modo consistente análises relativas à sustentabilidade, à inclusão social ou aos efeitos éticos das soluções desenvolvidas. Como resultado, forma-se um profissional altamente capacitado do ponto de vista operacional, mas frequentemente pouco preparado para compreender criticamente as implicações sociais de sua atuação.

A superação dessa limitação exige repensar não apenas os conteúdos curriculares, mas também as práticas pedagógicas que orientam a formação científica na engenharia. Nesse sentido, metodologias ativas e abordagens baseadas em projetos podem contribuir significativamente para aproximar teoria, investigação e responsabilidade social. Segundo Freire (1996), processos educativos críticos pressupõem a problematização da realidade concreta e a participação ativa dos sujeitos na construção do conhecimento. Aplicada ao ensino de engenharia, essa perspectiva permite transformar a pesquisa em experiência formativa voltada à compreensão e intervenção sobre problemas reais da sociedade.

A aprendizagem baseada em projetos, por exemplo, possibilita que os estudantes desenvolvam soluções tecnológicas articuladas a demandas sociais concretas, incorporando simultaneamente investigação científica, criatividade projetual e análise crítica dos impactos produzidos. Da mesma forma, estudos de caso, análise de conflitos sociotécnicos, elaboração de diagnósticos territoriais e avaliação de impactos ambientais podem ampliar a capacidade dos estudantes de compreender a tecnologia como fenômeno multidimensional.

Além disso, a integração entre extensão universitária, pesquisa e formação metodológica pode fortalecer experiências investigativas socialmente comprometidas. Ao dialogar com comunidades, movimentos sociais, organizações públicas e demandas coletivas, os estudantes passam a compreender que a produção tecnológica não ocorre em abstrato, mas em contextos históricos marcados por desigualdades, disputas de interesse e necessidades sociais concretas. Conforme Santos (2007), a universidade socialmente comprometida exige formas de conhecimento capazes de dialogar com diferentes saberes e realidades sociais, superando perspectivas exclusivamente tecnocráticas.

Essa mudança de perspectiva também exige valorização da dimensão ética na formação científica. A ética, nesse contexto, não deve ser entendida apenas como conjunto normativo de condutas profissionais, mas como reflexão crítica acerca das consequências humanas, sociais e ambientais das escolhas tecnológicas (Bazzo, 2014; Jonas, 2006). Como argumenta Jonas (2006), o poder ampliado da técnica nas sociedades contemporâneas impõe novas responsabilidades éticas aos sujeitos envolvidos nos processos de inovação e desenvolvimento científico.

Desse modo, a formação metodológica na engenharia precisa ultrapassar os limites do tecnicismo e incorporar uma compreensão ampliada da ciência e da tecnologia como práticas sociais historicamente situadas. Mais do que formar especialistas tecnicamente eficientes, trata-se de desenvolver profissionais capazes de articular conhecimento científico, pensamento crítico e compromisso social. A Metodologia Científica, nesse horizonte, deixa de constituir mero componente curricular instrumental e passa a assumir papel estratégico na formação de engenheiros comprometidos com a produção de conhecimento socialmente relevante e eticamente responsável (Bazzo, 2014).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As reflexões desenvolvidas ao longo deste artigo evidenciam que o ensino de Metodologia Científica na engenharia ultrapassa os limites de uma discussão estritamente pedagógica ou procedimental. Trata-se de um debate epistemológico, político e formativo, diretamente relacionado às concepções de ciência, tecnologia e sociedade que orientam a formação dos futuros engenheiros. A maneira como a pesquisa científica é concebida nos cursos de engenharia interfere não apenas na qualidade acadêmica dos Trabalhos de Conclusão de Curso, mas também na compreensão que os estudantes constroem acerca do papel social da ciência e da tecnologia.

A análise realizada permitiu identificar que a disciplina frequentemente se encontra tensionada entre dois extremos igualmente limitadores. De um lado, abordagens excessivamente abstratas, nas quais a reflexão epistemológica aparece dissociada das práticas concretas da engenharia. De outro, perspectivas tecnicistas que reduzem a pesquisa ao domínio de normas formais, procedimentos metodológicos e exigências burocráticas. Em ambos os casos, produz-se o esvaziamento do potencial formativo da

investigação científica, dificultando que os estudantes compreendam a pesquisa como processo crítico, criativo e socialmente situado.

Ao longo do texto, buscou-se demonstrar que a produção do conhecimento na engenharia não pode ser entendida apenas como aplicação instrumental de teorias previamente consolidadas. Projetar, experimentar, modelar e desenvolver soluções tecnológicas constituem também práticas investigativas, atravessadas por escolhas teóricas, decisões metodológicas e implicações sociais. A engenharia, nesse sentido, deve ser compreendida como campo produtor de conhecimento, e não apenas como espaço de operacionalização técnica.

Também se evidenciou que ciência e tecnologia não são neutras. As soluções tecnológicas desenvolvidas no âmbito da engenharia produzem impactos sociais, econômicos, ambientais e éticos que precisam ser incorporados ao processo formativo. Isso exige superar modelos educacionais centrados exclusivamente na eficiência técnica e na racionalidade instrumental, ampliando o espaço destinado à reflexão crítica sobre as finalidades sociais da produção científica e tecnológica.

Nessa perspectiva, a Metodologia Científica precisa ser reposicionada nos currículos de engenharia como espaço de formação intelectual, iniciação científica e problematização da realidade contemporânea. Mais do que ensinar normas acadêmicas ou técnicas de pesquisa, trata-se de criar condições para que os estudantes desenvolvam capacidades investigativas, pensamento crítico e responsabilidade social. A pesquisa, nesse contexto, deixa de constituir mera formalidade curricular e passa a assumir papel formativo central na construção de profissionais capazes de compreender a complexidade dos problemas tecnológicos contemporâneos.

Esse reposicionamento torna-se ainda mais relevante diante das transformações associadas à automação, à digitalização produtiva, às crises socioambientais e às profundas desigualdades que atravessam as sociedades contemporâneas. Formar engenheiros socialmente comprometidos implica desenvolver profissionais capazes não apenas de produzir soluções tecnicamente eficientes, mas também de refletir criticamente sobre as consequências humanas e sociais de suas escolhas.

Por fim, reconhece-se que este estudo possui caráter teórico-analítico e não esgota a complexidade do tema abordado. Como possibilidade de aprofundamento, sugerem-se investigações empíricas sobre práticas pedagógicas em Metodologia Científica nos cursos de engenharia, estudos acerca da integração entre epistemologia, design e formação tecnológica, bem como análises sobre experiências inovadoras de iniciação científica na graduação. Tais desdobramentos podem contribuir para fortalecer perspectivas formativas mais críticas, interdisciplinares e socialmente comprometidas no campo da engenharia.

REFERÊNCIAS

[1] BARDIN, Laurence. *Análise de conteúdo*. São Paulo: Edições 70, 2016.

[2] BAZZO, Walter Antonio. *Ciência, tecnologia e sociedade e o contexto da educação tecnológica*. 4. ed. Florianópolis: Editora UFSC, 2014.

[3] BAZZO, Walter Antonio; LINSINGEN, Irlan von; PEREIRA, Luiz Teixeira do Vale (org.). *Introdução aos estudos CTS (Ciência, Tecnologia e Sociedade)*. Madri: Organização dos Estados Ibero-Americanos, 2003.

[4] BRASIL. Lei nº 9.394, de 20 de dezembro de 1996. Estabelece as diretrizes e bases da educação nacional. Brasília, DF: Presidência da República, 1996. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9394.htm. Acesso em: 11 maio 2026.

[5] BUNGE, Mario. *Epistemologia: curso de atualização*. 2. ed. São Paulo: T. A. Queiroz; Edusp, 1987.

[6] CROSS, Nigel. *Designerly ways of knowing*. Basel: Birkhäuser, 2007.

[7] DEMO, Pedro. *Educar pela pesquisa*. 4. ed. Campinas: Autores Associados, 2000.

[8] FEYERABEND, Paul. *Contra o método*. Rio de Janeiro: Francisco Alves, 1977.

[9] FREIRE, Paulo. *Pedagogia da autonomia: saberes necessários à prática educativa*. São Paulo: Paz e Terra, 1996.

[10] HABERMAS, Jürgen. *Técnica e ciência como "ideologia"*. Lisboa: Edições 70, 1987.

[11] JONAS, Hans. *O princípio responsabilidade: ensaio de uma ética para a civilização tecnológica*. Rio de Janeiro: Contraponto; PUC-Rio, 2006.

[12] KUHN, Thomas S. *A estrutura das revoluções científicas*. 9. ed. São Paulo: Perspectiva, 2006.

[13] LAKATOS, Imre. *Falsificação e metodologia dos programas de investigação científica*. Lisboa: Edições 70, 1999.

[14] MORIN, Edgar. *Os sete saberes necessários à educação do futuro*. São Paulo: Cortez; Brasília, DF: UNESCO, 2000.

[15] POPPER, Karl. *Conjecturas e refutações: o progresso do conhecimento científico*. Brasília: Editora UnB, 1980.

[16] SANTOS, Boaventura de Sousa. *A universidade no século XXI: para uma reforma democrática e emancipatória da universidade*. São Paulo: Cortez, 2007.

[17] SCHÖN, Donald. *Educando o profissional reflexivo: um novo design para o ensino e a aprendizagem*. Porto Alegre: Artmed, 2000.

[18] SIMON, Herbert A. *The sciences of the artificial*. 3. ed. Cambridge, MA: MIT Press, 1996.

[19] VAN AKEN, Joan Ernst. Management research based on the paradigm of the design sciences: the quest for field-tested and grounded technological rules. *Journal of Management Studies*, v. 41, n. 2, p. 219–246, 2004. https://doi.org/10.1111/j.1467-6486.2004.00430.x

[20] WINNER, Langdon. *The whale and the reactor: a search for limits in an age of high technology*. Chicago: University of Chicago Press, 1986.

Capítulo 2

Desafios da utilização de ferramentas de inteligência artificial no processo de aprendizagem de estudantes de engenharia: uma análise crítica à luz da facilitação do acesso ao conhecimento

Alan Marques da Rocha
Ruann Campos de Castro Farrapo
Thales Guimarães Marques

Resumo: A rápida difusão de ferramentas baseadas em Inteligência Artificial (IA), em especial os modelos de linguagem de grande escala, alterou substancialmente as condições de acesso ao conhecimento na formação em Engenharia. Este capítulo apresenta uma análise crítica, de natureza teórico-bibliográfica, dos desafios associados à utilização dessas ferramentas por estudantes de Engenharia no que se refere ao processo de aprendizagem. A partir de revisão narrativa da literatura nacional e internacional, discutem-se cinco categorias de desafios: (i) o descarregamento cognitivo e o risco de dependência tecnológica, com implicações para a consolidação de esquemas mentais previstos pela Teoria da Carga Cognitiva; (ii) as tensões relativas à integridade acadêmica e à validade dos instrumentos de avaliação; (iii) a confiabilidade epistêmica das respostas geradas, marcadas por alucinações e vieses, e suas consequências para o desenvolvimento do pensamento crítico e do julgamento de engenharia; (iv) as desigualdades de acesso e a necessidade de letramento em IA; e (v) os desafios institucionais de formação docente e de redesenho curricular. Argumenta-se que a facilitação do acesso à informação não equivale à facilitação da aprendizagem, uma vez que a construção de competências em Engenharia depende do esforço cognitivo deliberado que as ferramentas de IA tendem a suprimir quando utilizadas de modo substitutivo. Conclui-se que a integração pedagógica intencional, orientada por políticas institucionais claras, avaliações reformuladas e desenvolvimento do letramento crítico em IA, constitui condição necessária para que tais tecnologias atuem como andaimes cognitivos, e não como atalhos que fragilizam a formação do engenheiro.

Palavras-chave: Inteligência Artificial; Aprendizado de Máquina; Educação em Engenharia; Processo de aprendizagem; Integridade acadêmica.

1. INTRODUÇÃO

A incorporação de sistemas de Inteligência Artificial (IA) ao cotidiano acadêmico deixou de ser uma projeção futura para se tornar um fato consumado nas instituições de ensino superior. Desde a popularização dos modelos de linguagem de grande escala (*Large Language Models* – LLMs), a exemplo do ChatGPT, lançado ao público em novembro de 2022, estudantes de Engenharia passaram a dispor de assistentes capazes de resolver problemas de cálculo, gerar códigos computacionais, redigir relatórios técnicos e sintetizar literatura científica em segundos (Kasneci et al., 2023). Trata-se de uma transformação nas condições materiais de acesso ao conhecimento cuja magnitude tem sido comparada, na literatura, à introdução da calculadora eletrônica e dos mecanismos de busca na internet, porém com alcance funcional consideravelmente superior (Qadir, 2023).

A facilitação do acesso ao conhecimento proporcionada por essas ferramentas é, à primeira vista, um ganho inequívoco: reduz barreiras linguísticas, oferece tutoria disponível em tempo integral, personaliza explicações conforme o nível do estudante e democratiza o contato com conteúdos antes restritos a bibliotecas especializadas (Zawacki-Richter et al., 2019; Chen; Chen; Lin, 2020). Contudo, a literatura recente em educação em Engenharia tem evidenciado que o acesso facilitado à informação não se converte automaticamente em aprendizagem efetiva. Ao contrário, há indícios consistentes de que o uso substitutivo e não complementar dessas ferramentas pode comprometer a construção de esquemas cognitivos, a autonomia intelectual e o desenvolvimento do julgamento profissional que caracterizam a formação do engenheiro (Bastani et al., 2024; Darvishi et al., 2024).

Nesse contexto, o presente capítulo tem por objetivo analisar criticamente os desafios da utilização de ferramentas de IA por estudantes de Engenharia no que diz respeito ao processo de aprendizagem, tendo como fio condutor a tensão entre a facilitação do acesso ao conhecimento e as condições cognitivas, pedagógicas e institucionais necessárias à aprendizagem significativa. Especificamente, busca-se: (i) caracterizar o panorama de adoção dessas ferramentas no ensino de Engenharia; (ii) identificar e sistematizar, com base na literatura, os principais desafios ao processo de aprendizagem; e (iii) discutir diretrizes para a integração pedagógica responsável dessas tecnologias.

A relevância do tema justifica-se por três razões. Primeiro, pela velocidade da adoção: levantamentos internacionais indicam que a maioria dos estudantes de graduação já utiliza ferramentas de IA generativa em atividades acadêmicas, frequentemente sem orientação institucional (Cotton; Cotton; Shipway, 2024). Segundo, pela especificidade da formação em Engenharia, que exige domínio procedimental de métodos matemáticos, físicos e computacionais cuja automatização precoce pode fragilizar competências nucleares (Johri et al., 2023). Terceiro, pela lacuna normativa e pedagógica: grande parte das instituições ainda não dispõe de políticas claras nem de estratégias avaliativas adequadas ao novo cenário (UNESCO, 2023).

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NO CONTEXTO EDUCACIONAL

A IA pode ser compreendida como o campo dedicado ao desenvolvimento de sistemas computacionais capazes de executar tarefas que, quando realizadas por seres humanos, demandam inteligência, tais como raciocínio, reconhecimento de padrões, compreensão de linguagem e tomada de decisão (Russell; Norvig, 2021). O Aprendizado Profundo (*Deep Learning* - DL), subcampo da IA, refere-se aos métodos pelos quais tais sistemas aprimoram seu desempenho a partir de dados, sem programação explícita de regras para cada situação. No domínio educacional, essas tecnologias materializam-se em sistemas de tutoria inteligente, plataformas adaptativas, ferramentas de correção automatizada, sistemas de recomendação de conteúdo e, mais recentemente, assistentes conversacionais baseados em LLMs (Luckin et al., 2016; Holmes; Bialik; Fadel, 2019).

Zawacki-Richter et al. (2019), em revisão sistemática sobre aplicações de IA no ensino superior, identificaram quatro grandes categorias de uso: perfilamento e predição de desempenho, sistemas de tutoria inteligente, avaliação automatizada e sistemas adaptativos de personalização. Os autores destacam, contudo, uma lacuna preocupante: a maior parte da produção científica da área é conduzida sob perspectiva tecnológica, com reduzida participação de pesquisadores em educação e escassa fundamentação em teorias de aprendizagem o que ajuda a explicar por que os riscos pedagógicos do uso dessas ferramentas permaneceram, por anos, subteorizados. Na mesma direção, Bearman, Ryan e Ajjawi (2023) observam que os discursos sobre IA na educação superior tendem a oscilar entre o entusiasmo determinista e o alarmismo, com pouca análise das condições concretas de apropriação pelos estudantes.

2.2. A PERSPECTIVA COGNITIVA: CARGA COGNITIVA, ESQUEMAS E ESFORÇO DESEJÁVEL

A análise dos efeitos das ferramentas de IA sobre a aprendizagem exige um referencial sobre como se aprende. A Teoria da Carga Cognitiva (TCC), formulada por Sweller (1988), sustenta que a aprendizagem consiste na construção e automatização de esquemas na memória de longo prazo, processo condicionado pelas limitações da memória de trabalho. Sob essa ótica, a resolução de problemas por parte do aprendiz não é um mero produto da aprendizagem, mas o próprio mecanismo pelo qual os esquemas se consolidam: é o esforço de selecionar estratégias, cometer erros, comparar caminhos e reorganizar o conhecimento que produz estruturas cognitivas duráveis.

Kirschner, Sweller e Clark (2006) demonstram que abordagens de instrução com orientação mínima são ineficazes para aprendizes novatos, que carecem dos esquemas necessários para processar informação de forma autônoma. O argumento é relevante para o debate sobre IA em duplo sentido: por um lado, ferramentas que oferecem explicações estruturadas e exemplos resolvidos podem funcionar como andaimes (*scaffolds*) que reduzem a carga cognitiva estranha e apoiam o novato; por outro, quando a ferramenta executa integralmente a tarefa, suprime-se o processamento germane, ou seja, o esforço cognitivo produtivo e a aprendizagem simplesmente não ocorre, ainda que a tarefa seja concluída com êxito aparente. Essa distinção entre desempenho na tarefa e aprendizagem do estudante é central para o presente capítulo.

Complementarmente, pesquisas sobre memória transacional indicam que indivíduos tendem a não reter informações que sabem estar permanentemente acessíveis em

sistemas externos, fenômeno documentado por Sparrow, Liu e Wegner (2011) em relação aos mecanismos de busca e conhecido como "efeito Google". A generalização desse fenômeno para assistentes de IA que não apenas armazenam, mas processam e resolvem sugere um potencial de descarregamento cognitivo (*cognitive offloading*) qualitativamente mais profundo, com implicações diretas para a formação de engenheiros.

2.3. ESPECIFICIDADES DA FORMAÇÃO EM ENGENHARIA

A educação em engenharia articula três dimensões formativas: o domínio conceitual das ciências básicas, a proficiência procedimental em métodos de modelagem, cálculo e projeto, e o desenvolvimento do julgamento de engenharia e a capacidade de tomar decisões tecnicamente fundamentadas sob incerteza, considerando restrições econômicas, normativas, ambientais e de segurança (Felder; Silverman, 1988; Johri et al., 2023). Diferentemente de campos em que a produção textual é o principal artefato acadêmico, a engenharia exige que o estudante internalize procedimentos: dimensionar uma viga, depurar um algoritmo, balancear um processo químico ou interpretar um diagrama de fases são competências que não se transferem pela leitura de soluções prontas, mas pela prática deliberada e supervisionada.

É precisamente nesse ponto que a facilitação do acesso ao conhecimento promovida pela IA se revela ambivalente. Como observam Johri et al. (2023), a IA generativa executa com desenvoltura justamente as tarefas que estruturam a avaliação tradicional nos cursos de engenharia com listas de exercícios, códigos, relatórios de laboratório, etc, criando um descompasso entre aquilo que o estudante entrega e aquilo que ele efetivamente sabe fazer.

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este estudo caracteriza-se como pesquisa qualitativa, de natureza teórica, do tipo revisão narrativa de literatura com abordagem analítico-crítica. A opção pela revisão narrativa justifica-se pelo caráter emergente e multidisciplinar do fenômeno investigado, que demanda a articulação de fontes oriundas da educação em engenharia, da psicologia cognitiva, da ciência da computação e dos estudos sobre política educacional, dificilmente capturáveis por protocolos estritamente sistemáticos em um campo em rápida transformação.

O *corpus* foi constituído por artigos publicados em periódicos revisados por pares, capítulos de livros, relatórios de organismos internacionais e anais de eventos de referência na área de educação em engenharia, localizados nas bases Scopus, Web of Science, IEEE Xplore, ERIC e Google Scholar. Utilizaram-se combinações dos descritores, em português e inglês: "inteligência artificial", "aprendizado de máquina", "IA generativa", "ChatGPT", "educação em engenharia", "aprendizagem", "integridade acadêmica" e "carga cognitiva". Priorizaram-se publicações do período de 2016 a 2024, sem exclusão de obras seminais anteriores necessárias à fundamentação teórica. A análise do material seguiu procedimento de categorização temática, do qual emergiram as cinco categorias de desafios apresentadas na seção seguinte.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO: OS DESAFIOS AO PROCESSO DE APRENDIZAGEM

4.1. DESCARREGAMENTO COGNITIVO E RISCO DE DEPENDÊNCIA TECNOLÓGICA

O primeiro e mais fundamental desafio identificado na literatura refere-se ao descarregamento cognitivo: a transferência, para a ferramenta, de operações mentais que deveriam ser exercitadas pelo estudante. Evidências empíricas recentes são particularmente eloquentes. Bastani et al. (2024), em experimento de campo randomizado com cerca de mil estudantes em cursos de matemática, verificaram que o acesso irrestrito a um assistente baseado em GPT-4 melhorou significativamente o desempenho durante as atividades assistidas, mas resultou em desempenho inferior ao do grupo de controle quando o acesso foi removido indicando que os estudantes resolviam mais e aprendiam menos. Notavelmente, uma versão do assistente projetada com salvaguardas pedagógicas, que fornecia pistas em vez de respostas, mitigou o efeito negativo, o que reforça que o problema não reside na tecnologia em si, mas no modo de uso substitutivo.

Resultados convergentes foram obtidos por Darvishi et al. (2024), que, ao investigarem o uso prolongado de assistência por IA em atividades de avaliação por pares, constataram que os estudantes tendiam a se apoiar na assistência em vez de desenvolver as habilidades correspondentes: retirado o suporte, o desempenho regredia aos níveis anteriores. Para a formação em engenharia, tais achados são especialmente graves. A automatização precoce da resolução de problemas etapa em que, segundo a TCC, se dá a construção de esquemas (Sweller, 1988) compromete a fluência procedimental sobre a qual se assentam as competências de níveis superiores, como o projeto e a análise crítica de soluções. O estudante que delega sistematicamente a derivação de um modelo, a verificação dimensional de uma equação ou a depuração de um código priva-se do erro produtivo e da prática deliberada, elementos constitutivos do aprender a fazer engenharia (Kirschner; Sweller; Clark, 2006).

Cabe ainda registrar a dimensão metacognitiva do problema: a fluência das respostas geradas por LLMs tende a produzir no estudante uma ilusão de competência, na qual a compreensão da explicação é confundida com a capacidade de reproduzir o raciocínio de forma autônoma. Esse fenômeno, análogo ao efeito de familiaridade descrito na literatura sobre memória transacional (Sparrow; Liu; Wegner, 2011), dificulta a autorregulação da aprendizagem, pois corrompe o principal instrumento de que o estudante dispõe para calibrar seus estudos: a percepção acurada do que sabe e do que não sabe.

4.2. INTEGRIDADE ACADÊMICA E VALIDADE DA AVALIAÇÃO

O segundo desafio articula a dimensão ética à dimensão pedagógica. A capacidade dos LLMs de gerar textos, códigos e resoluções indistinguíveis, em muitos casos, da produção humana coloca sob tensão os instrumentos tradicionais de avaliação. Cotton e Shipway (2024) sistematizam o dilema: as ferramentas de detecção automática de conteúdo gerado por IA apresentam confiabilidade limitada, com taxas relevantes de falsos positivos e negativos, o que inviabiliza estratégias puramente punitivas e desloca o problema para o terreno do redesenho avaliativo. No mesmo sentido, Qadir (2023) argumenta que, na educação em engenharia, a resposta institucional adequada não é a proibição de eficácia improvável, mas a reformulação das avaliações em direção a formatos que exijam desempenho autêntico: defesas orais, avaliações práticas em

laboratório, projetos com acompanhamento processual e exames presenciais focados em raciocínio.

O ponto crítico, para os fins deste capítulo, é que a fraude mediada por IA não constitui apenas uma infração disciplinar, mas um curto-circuito no processo de aprendizagem: o estudante que submete trabalho gerado por IA obtém a certificação sem a competência correspondente, transferindo o custo dessa lacuna para etapas posteriores da formação e, em última instância, para o exercício profissional, sendo uma questão particularmente sensível em engenharia, na qual decisões técnicas envolvem segurança de pessoas e de infraestruturas. Ademais, a erosão da confiança entre docentes e estudantes, decorrente da suspeita generalizada, degrada o ambiente pedagógico e pode penalizar injustamente estudantes que produzem trabalho autoral (Cotton; Cotton; Shipway, 2024).

4.3. CONFIABILIDADE EPISTÊMICA: ALUCINAÇÕES, VIESES E PENSAMENTO CRÍTICO

O terceiro desafio diz respeito à qualidade epistêmica dos conteúdos aos quais o acesso foi facilitado. LLMs são modelos probabilísticos de linguagem que geram texto plausível, e não sistemas de recuperação de fatos verificados; disso decorre o fenômeno das alucinações ou afirmações fluentes, porém falsas ou fabricadas, incluindo referências bibliográficas inexistentes, valores numéricos incorretos e procedimentos tecnicamente inválidos (Kasneci et al., 2023). Em domínios de engenharia, o risco é agravado pela assimetria de conhecimento: o estudante novato, justamente por não dominar o conteúdo, é o menos capacitado a identificar o erro, ao passo que a apresentação confiante e bem estruturada da resposta desencoraja a verificação.

Some-se a isso a questão dos vieses herdados dos dados de treinamento e da opacidade dos modelos, que impossibilita ao usuário auditar o processo pelo qual uma resposta foi produzida (Holmes; Bialik; Fadel, 2019; Bearman; Ryan; Ajjawi, 2023). Do ponto de vista formativo, a exposição continuada a um oráculo opaco e falível, tratado como fonte primária de conhecimento, tende a inverter a lógica da formação científica: em vez de partir de fontes verificáveis para construir conclusões, o estudante parte de conclusões prontas cuja verificação frequentemente não realiza. Selwyn (2019) alerta que a delegação acrítica de funções cognitivas e pedagógicas a sistemas automatizados envolve escolhas de valor que não podem ser tratadas como meramente técnicas. Assim, paradoxalmente, a ferramenta que facilita o acesso à informação pode dificultar a formação do pensamento crítico, sendo competência explicitamente requerida dos egressos de engenharia pelas Diretrizes Curriculares Nacionais brasileiras (Brasil, 2019).

4.4. DESIGUALDADE DE ACESSO E LETRAMENTO EM IA

O quarto desafio desloca a análise do plano cognitivo para o plano socioeducacional. A facilitação do acesso ao conhecimento não se distribui de maneira homogênea: as versões mais capazes das ferramentas de IA são pagas, demandam conectividade estável e dispositivos adequados, e seu uso produtivo pressupõe competências prévias como o domínio da língua inglesa, familiaridade digital e, sobretudo, capacidade de formular boas perguntas e avaliar respostas. A UNESCO (2023), em suas diretrizes para IA generativa na educação, adverte que a adoção não regulada dessas tecnologias pode aprofundar a exclusão digital e as desigualdades educacionais entre países e dentro deles, recomendando políticas ativas de equidade.

Emerge daí a noção de letramento em IA (AI *literacy*) como componente curricular necessário: a capacidade de compreender, em nível funcional, como os sistemas de IA operam, quais são seus limites, como interrogá-los produtivamente e como verificar seus resultados (Ng et al., 2021). Para estudantes de engenharia, esse letramento possui dupla natureza, pois são simultaneamente usuários e futuros desenvolvedores e integradores dessas tecnologias, o que torna a lacuna formativa duplamente onerosa. Sem letramento crítico, o acesso facilitado beneficia desproporcionalmente os estudantes já mais bem preparados, que utilizam a IA como amplificador, enquanto os demais tendem ao uso substitutivo, ampliando a distância entre os dois grupos (Bastani et al., 2024).

4.5. DESAFIOS INSTITUCIONAIS: FORMAÇÃO DOCENTE E REDESENHO CURRICULAR

O quinto desafio situa-se no plano institucional. A literatura converge quanto à constatação de que docentes de engenharia, em sua maioria, não receberam formação para integrar pedagogicamente ferramentas de IA, e as instituições, em grande parte, ainda operam com regulamentos anteriores ao fenômeno (Zawacki-Richter et al., 2019; UNESCO, 2023). A ausência de políticas claras produz um vácuo normativo no qual coexistem, na mesma instituição por vezes no mesmo curso, proibições absolutas e incentivos entusiasmados, gerando insegurança para estudantes e professores.

As propostas de enfrentamento documentadas na literatura organizam-se em três eixos. O primeiro é o redesenho avaliativo, com ênfase em avaliação processual, desempenho autêntico e explicitação, em cada atividade, do uso permitido de IA (Qadir, 2023; Cotton; Cotton; Shipway, 2024). O segundo é a integração pedagógica estruturada, na qual a ferramenta é incorporada com papéis definidos tutor socrático, simulador de cenários, revisor de código, gerador de contraexemplos, sempre com mecanismos que preservem o esforço cognitivo do estudante, na linha das abordagens propostas por Mollick e Mollick (2023) e corroboradas pelos resultados de Bastani et al. (2024) quanto à eficácia de assistentes com salvaguardas pedagógicas. O terceiro eixo é o desenvolvimento profissional docente, condição para que os dois primeiros não permaneçam no plano retórico. Em todos os eixos, o critério orientador deve ser o mesmo: a tecnologia deve ser posicionada de modo a aumentar, e não substituir, o trabalho cognitivo que produz aprendizagem.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo analisa os desafios da utilização de ferramentas de IA por estudantes de engenharia sob a perspectiva do processo de aprendizagem. A análise da literatura permitiu sistematizar cinco categorias de desafio descarregamento cognitivo e dependência, integridade acadêmica e validade avaliativa, confiabilidade epistêmica, desigualdade de acesso e letramento em IA, e desafios institucionais de formação docente e redesenho curricular que,em conjunto, sustentam a tese central do trabalho: a facilitação do acesso ao conhecimento não equivale à facilitação da aprendizagem. O conhecimento acessível é condição necessária, mas não suficiente; a aprendizagem em engenharia continua a depender do esforço cognitivo deliberado, da prática supervisionada e do erro produtivo precisamente os elementos que o uso substitutivo da IA tende a suprimir.

Disso não decorre, contudo, uma conclusão com aversão a tecnologia. As evidências analisadas indicam que os efeitos das ferramentas de IA sobre a aprendizagem são mediados pelo desenho pedagógico do seu uso: as mesmas tecnologias que, empregadas

como atalho, fragilizam a formação, podem, empregadas como andaime, ampliar o alcance da tutoria, personalizar percursos e liberar tempo docente para atividades de maior valor formativo. O desafio posto às instituições de ensino de engenharia é, portanto, de natureza pedagógica e política: estabelecer normas claras e exequíveis, reformular avaliações em direção ao desempenho autêntico, incorporar o letramento crítico em IA aos currículos e investir na formação docente.

Como limitações, registra-se que a revisão narrativa aqui empreendida não esgota a produção do campo, em acelerada expansão, e que boa parte das evidências empíricas disponíveis provém de contextos internacionais, cabendo cautela na transposição para a realidade brasileira. Sugere-se, como agenda de pesquisa, a condução de estudos empíricos longitudinais com estudantes de engenharia no Brasil, a investigação de desenhos avaliativos resistentes ao uso substitutivo de IA e o desenvolvimento de instrumentos validados para medir letramento em IA e descarregamento cognitivo em contextos de formação tecnológica.

REFERÊNCIAS

[1] BASTANI, H.; BASTANI, O.; SUNGU, A.; GE, H.; KABAKCI, Ö.; MARIMAN, R. Generative AI can harm learning. The Wharton School Research Paper. Philadelphia: University of Pennsylvania, 2024. Disponível em: https://ssrn.com/abstract=4895486. Acesso em: 10 jul. 2026.

[2] BEARMAN, M.; RYAN, J.; AJJAWI, R. Discourses of artificial intelligence in higher education: a critical literature review. Higher Education, v. 86, n. 2, p. 369-385, 2023.

[3] BRASIL. Ministério da Educação. Conselho Nacional de Educação. Resolução CNE/CES nº 2, de 24 de abril de 2019. Institui as Diretrizes Curriculares Nacionais do Curso de Graduação em Engenharia. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 26 abr. 2019.

[4] CHEN, L.; CHEN, P.; LIN, Z. Artificial intelligence in education: a review. IEEE Access, v. 8, p. 75264-75278, 2020.

[5] COTTON, D. R. E.; COTTON, P. A.; SHIPWAY, J. R. Chatting and cheating: ensuring academic integrity in the era of ChatGPT. Innovations in Education and Teaching International, v. 61, n. 2, p. 228-239, 2024.

[6] DARVISHI, A.; KHOSRAVI, H.; SADIQ, S.; GAŠEVIĆ, D.; SIEMENS, G. Impact of AI assistance on student agency. Computers & Education, v. 210, art. 104967, 2024.

[7] FELDER, R. M.; SILVERMAN, L. K. Learning and teaching styles in engineering education. Engineering Education, v. 78, n. 7, p. 674-681, 1988.

[8] HOLMES, W.; BIALIK, M.; FADEL, C. Artificial intelligence in education: promises and implications for teaching and learning. Boston: Center for Curriculum Redesign, 2019.

[9] JOHRI, A.; KATZ, A. S.; QADIR, J.; HINGLE, A. Generative artificial intelligence and engineering education. Journal of Engineering Education, v. 112, n. 3, p. 572-577, 2023.

[10] KASNECI, E. et al. ChatGPT for good? On opportunities and challenges of large language models for education. Learning and Individual Differences, v. 103, art. 102274, 2023.

[11] KIRSCHNER, P. A.; SWELLER, J.; CLARK, R. E. Why minimal guidance during instruction does not work: an analysis of the failure of constructivist, discovery, problem-based, experiential, and inquiry-based teaching. Educational Psychologist, v. 41, n. 2, p. 75-86, 2006.

[12] LUCKIN, R.; HOLMES, W.; GRIFFITHS, M.; FORCIER, L. B. Intelligence unleashed: an argument for AI in education. London: Pearson, 2016.

[13] MOLLICK, E.; MOLLICK, L. Assigning AI: seven approaches for students, with prompts. SSRN Electronic Journal, 2023. Disponível em: https://ssrn.com/abstract=4475995. Acesso em: 10 jul. 2026.

[14] NG, D. T. K.; LEUNG, J. K. L.; CHU, S. K. W.; QIAO, M. S. Conceptualizing AI literacy: an exploratory

review. Computers and Education: Artificial Intelligence, v. 2, art. 100041, 2021.

[15] QADIR, J. Engineering education in the era of ChatGPT: promise and pitfalls of generative AI for education. In: IEEE GLOBAL ENGINEERING EDUCATION CONFERENCE (EDUCON), 2023, Kuwait. Proceedings [...]. Piscataway: IEEE, 2023. p. 1-9.

[16] RUSSELL, S.; NORVIG, P. Artificial intelligence: a modern approach. 4. ed. Hoboken: Pearson, 2021.

[17] SELWYN, N. Should robots replace teachers? AI and the future of education. Cambridge: Polity Press, 2019.

[18] SPARROW, B.; LIU, J.; WEGNER, D. M. Google effects on memory: cognitive consequences of having information at our fingertips. Science, v. 333, n. 6043, p. 776-778, 2011.

[19] SWELLER, J. Cognitive load during problem solving: effects on learning. Cognitive Science, v. 12, n. 2, p. 257-285, 1988.

[20] UNESCO. Guidance for generative AI in education and research. Paris: UNESCO, 2023.

[21] ZAWACKI-RICHTER, O.; MARÍN, V. I.; BOND, M.; GOUVERNEUR, F. Systematic review of research on artificial intelligence applications in higher education – where are the educators? International Journal of Educational Technology in Higher Education, v. 16, art. 39, 2019.

Capítulo 3

Estratégias para estudo do processo de fratura no ensaio de dureza vickers em materiais compostos através do MEF

Victor Campos Rodrigues Pinheiro
Avelino Manuel da Silva Dias
Fabio Dalmazzo Sanches

Resumo: A dureza é uma importante propriedade mecânica relacionada à resistência de um material à penetração de um corpo mais rígido, sendo amplamente utilizada em pesquisas, especificações técnicas e desenvolvimento tecnológico. Em materiais metálicos, está associada à resistência mecânica, ao desgaste e ao desempenho superficial, enquanto em materiais frágeis, como cerâmicas e vidros, relaciona-se à elevada resistência à deformação superficial e à baixa capacidade de absorção de energia antes da fratura. Nos materiais compostos, a dureza depende da matriz, do tipo e da quantidade de reforço, além da qualidade da interface entre os constituintes. Fibras de carbono, fibras de vidro e partículas cerâmicas podem aumentar a rigidez superficial e a resistência ao desgaste, embora defeitos interfaciais, vazios e má dispersão do reforço possam comprometer o desempenho mecânico do material. Entre os métodos de avaliação da dureza, destaca-se o ensaio Vickers, que utiliza um indentador piramidal de diamante capaz de produzir impressões geometricamente semelhantes em diferentes níveis de carga. Esse ensaio é amplamente usado na caracterização de metais, cerâmicas, polímeros, compósitos e revestimentos superficiais, permitindo não apenas determinar a dureza superficial, mas também estimar propriedades mecânicas como módulo de elasticidade e tenacidade à fratura. Entretanto, a utilização dessas metodologias ainda apresenta incertezas, principalmente em materiais com comportamento mecânico complexo, como revestimentos e compósitos, devido à diversidade de modelos e equações disponíveis para descrever os mecanismos de nucleação e propagação de trincas. Nos últimos anos, os ensaios de indentação passaram a ser estudados por meio de modelos numéricos de elementos finitos associados aos conceitos da mecânica da fratura e da mecânica dos meios contínuos. Essas metodologias permitem avaliar os mecanismos de dano, nucleação e crescimento de falhas estruturais em diferentes classes de materiais, incluindo materiais dúcteis, frágeis e compósitos. A utilização da simulação numérica representa uma importante tendência na engenharia moderna, pois possibilita a otimização de projetos, a redução de custos experimentais e a análise da integridade mecânica de componentes estruturais. Nesse contexto, o principal objetivo das pesquisas nessa área tem sido de desenvolver metodologias rápidas, confiáveis e com moderado custo computacional, integrando análises numéricas com análises experimentais para determinar o comportamento mecânico de materiais compostos, estruturas híbridas e revestimentos superficiais. Além da relevância científica, essas abordagens possuem grande importância tecnológica e industrial, pois contribuem para a otimização de procedimentos experimentais, formação de recursos humanos especializados, desenvolvimento de novos materiais e possíveis inovações tecnológicas, permitindo avanços significativos na avaliação da integridade estrutural e no desempenho mecânico de materiais modernos.

1. INTRODUÇÃO

A dureza é uma propriedade mecânica que representa a resistência à penetração de um corpo mais rígido em outro material. Em termos práticos, materiais mais duros apresentam maior resistência à deformação plástica permanente quando submetidos à ação de indentadores. Ao longo dos anos, essa propriedade tem sido amplamente empregada em especificações técnicas, pesquisas e desenvolvimento tecnológico (DIAS, 2004; SOUZA, 2000).

Nos materiais metálicos, a dureza está relacionada à resistência mecânica, ao desgaste e à capacidade de suportar esforços superficiais, sendo frequentemente utilizada na avaliação de tratamentos térmicos, controle de qualidade e desempenho industrial (SOUZA, 2000).

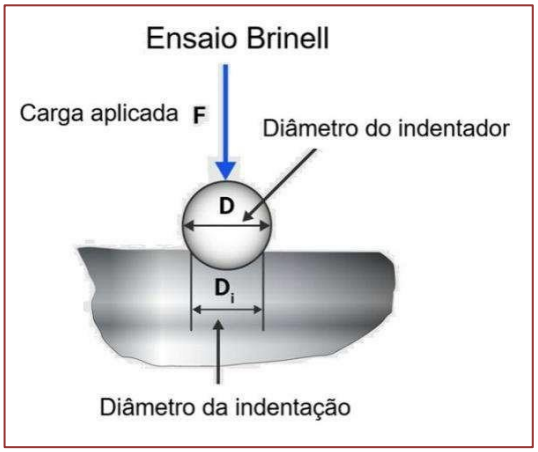
Em materiais frágeis, essa propriedade associa-se à elevada resistência à deformação superficial, porém com limitada capacidade de absorção de energia antes da fratura. Cerâmicas, vidros e alguns ferros fundidos apresentam altos valores de dureza devido às fortes ligações atômicas e à baixa mobilidade de discordâncias na estrutura cristalina. Assim, resistem significativamente à penetração e ao desgaste, mas tendem a fraturar abruptamente quando submetidos a tensões elevadas ou impactos (SOUZA, 2000; CALLISTER JUNIOR, 2014).

Nos materiais compostos, a dureza depende da matriz, do tipo e da fração volumétrica do reforço, além da qualidade da interface entre os constituintes. Em compósitos poliméricos reforçados com fibras ou partículas, a incorporação do reforço geralmente aumenta a resistência à deformação localizada e ao desgaste superficial. Partículas cerâmicas, fibras de carbono, fibras de vidro e cargas lignocelulósicas podem restringir o movimento molecular da matriz, elevando sua rigidez superficial (CALLISTER JUNIOR, 2014; ARAÚJO *et al.,* 2026).

Entretanto, o comportamento desses compostos pode ser heterogêneo, pois regiões ricas em matriz e em reforço respondem de forma distinta à indentação. Além disso, defeitos interfaciais, vazios e má dispersão das partículas reduzem a eficiência do reforço. Em alguns casos, o aumento da dureza pode também elevar a fragilidade do compósito, principalmente em compostas com elevados teores de partículas rígidas (CALLISTER JUNIOR, 2014; SHACKELFORD, 2008).

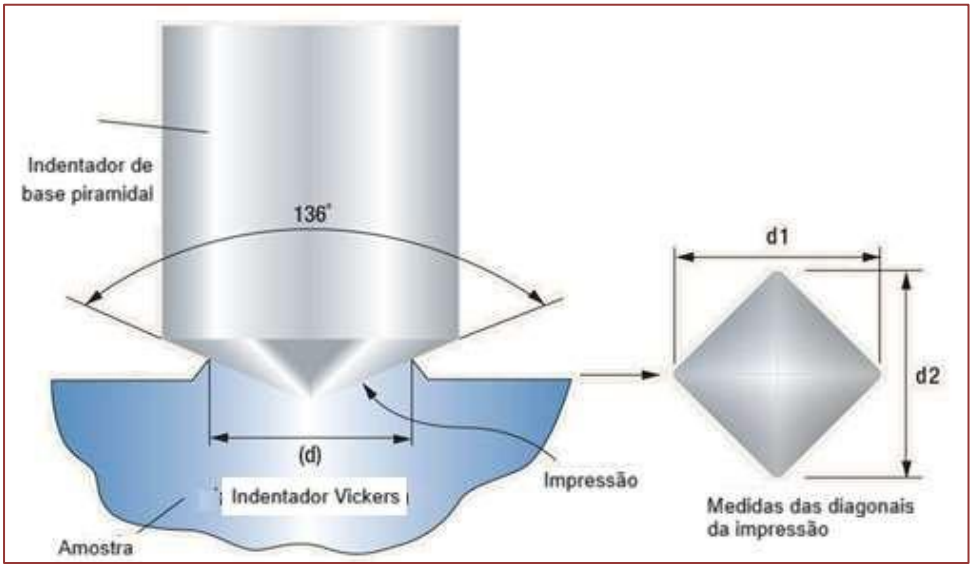
Os ensaios de dureza mais comuns utilizam penetradores esféricos, como no método Brinell (Figura 1), ou piramidais, como no ensaio Vickers (Figura 2), também empregado em análises microestruturais (DIAS, 2004; CHAVES FILHO& DIAS, 2019; ARAÚJO *et al.,* 2026). O indentador Vickers consiste em uma pirâmide de diamante de base quadrada com ângulo de 136° entre faces opostas. Por ser praticamente indeformável, produz impressões geometricamente semelhantes, tornando a dureza Vickers praticamente independente da carga aplicada dentro de determinados limites, especialmente em materiais homogêneos (SOUZA, 2000).

Figura 1. Ilustração do ensaio de dureza com indentador esférico Brinell.



Os ensaios de indentação Vickers são amplamente utilizados na caracterização de metais, cerâmicas, polímeros, materiais compostos e em revestimentos superficiais (LARSSON & GIANNAKOPOULOS, 1998). Devido à sua versatilidade, diversas metodologias vêm sendo desenvolvidas para avaliar propriedades além da dureza superficial (H*v*), como o módulo de Young (E), a tenacidade à fratura (K*ic*) e uma curva de fluxo do comportamento elastoplástico (ZENG & CHIU, 2001).

Figura 2. Ilustração do ensaio de dureza com indentador piramidal de base quadrada Vickers.



Apesar disso, a aplicação dessas metodologias ainda gera discussões no meio científico (PONTON & RAWLINGS, 1989). As incertezas tornam-se mais relevantes na avaliação de materiais com comportamento mecânico complexo, como revestimentos, compósitos poliméricos e metais duros que, embora predominantemente frágeis, podem apresentar pequenas frações dúcteis.

Esses materiais frequentemente apresentam dificuldades na confecção de corpos de prova para ensaios convencionais. Por esse motivo, ensaios experimentais alternativos têm sido empregados na avaliação de propriedades mecânicas, especialmente da tenacidade à fratura (SZUTKOWSKA, 1999), destacando-se o ensaio Vickers. Contudo, sua aplicação apresenta limitações relacionadas à diversidade de equações experimentais disponíveis na literatura, baseadas em diferentes mecanismos de nucleação e propagação de trincas (PONTON &RAWLINGS, 1989).

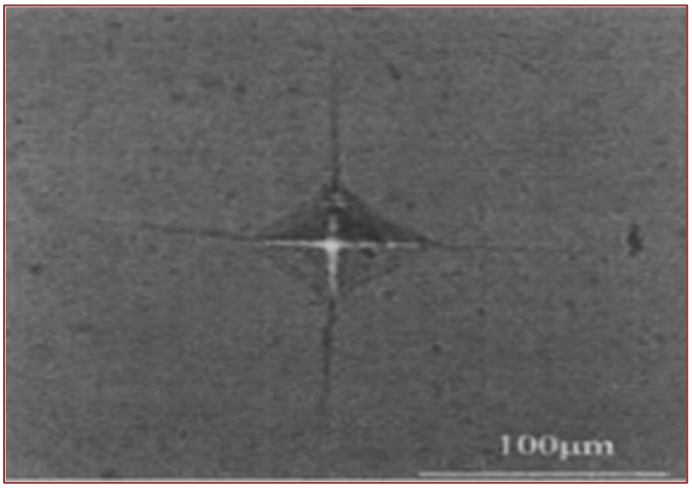
Nas últimas décadas, o ensaio Vickers passou a ser estudado por meio de modelos discretos de elementos finitos, visando avaliar o comportamento de diferentes materiais submetidos à indentação (LARSSON & GIANNAKOPOULOS, 1998). Essas abordagens também incorporam conceitos da mecânica da fratura, utilizando critérios de dano e fatores críticos de intensidade de tensão. Tais metodologias vêm sendo aplicadas tanto em materiais dúcteis quanto frágeis, além de materiais compostos e em revestimentos superficiais. Entretanto, a adequada incorporação dos fenômenos mecânicos associados à fratura permanece fundamental para a confiabilidade dessas análises.

Neste capítulo, será apresentada a análise numérica de ensaios de indentação Vickers por meio de modelos tridimensionais de elementos finitos, utilizando elementos isoparamétricos capazes de representar problemas com elevados gradientes de tensão e deformação, bem como comportamento mecânico não linear.

2. PROCESSOS DE FRATURA NO ENSAIO VICKERS

Materiais com comportamento frágeis submetidos a ensaios de indentação podem apresentar trincas ao redor da impressão do penetrador (Figura 3). A observação dessas trincas e sua possível correlação com a tenacidade à fratura foi inicialmente proposta por Palmqvist (1967). Posteriormente, Evans e Charles (1976) estudaram análises mais detalhadas, relacionando a geometria das trincas, a carga aplicada e a tenacidade à fratura do material (K*ic*).

Figura 3. Trincas radiais superficiais observadas na amostra após ensaio Vickers.

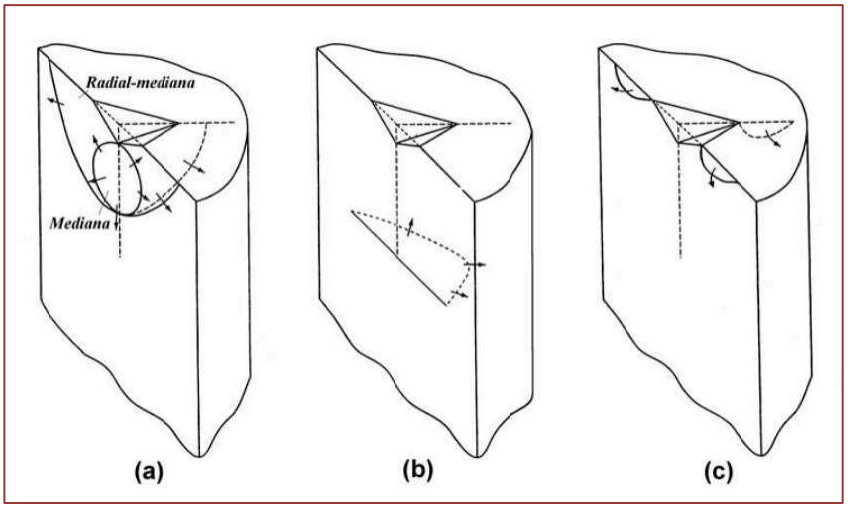


A técnica de indentação, baseada nos conceitos da mecânica da fratura (*MFLE*), tem sido amplamente utilizada na avaliação da tenacidade à fratura, do desgaste e da erosão em materiais frágeis (McCOLM, 1990). Porém, a metodologia apresenta limitações, como a dificuldade na medição precisa das trincas superficiais, a existência de diferentes mecanismos de nucleação de trincas e a diversidade de equações semiempíricas disponíveis na literatura, o que pode gerar discrepâncias entre os resultados obtidos por indentação e aqueles determinados por métodos convencionais da mecânica da fratura.

Durante o ensaio de indentação com penetradores piramidais podem surgir diferentes sistemas de trincas, entre eles: mediana, lateral, Palmqvist e radial (Figura 4). Essas trincas podem ser nucleadas tanto durante a fase de carregamento quanto durante a fase de descarregamento, devido aos campos de tensões residuais gerados ao redor da impressão.

A Figura 4a mostra a trinca mediana, que se nucleia abaixo da indentação, na interface entre as regiões deformadas plasticamente e elasticamente, propagando- se de forma estável até atingir uma condição crítica, quando ocorre propagação instável e a formação de trincas radial-medianas visíveis na superfície. Já as trincas laterais (Figura 4b) desenvolvem-se paralelamente à superfície, geralmente durante o descarregamento, estando associadas a processos de desgaste e escamação superficial (MARSHALL *et al.*, 1982).

Figura 4. Ilustração esquemática das trincas após ensaio Vickers: (a) mediana e radial-mediana; (b) lateral; e, (c) Palmqvist.



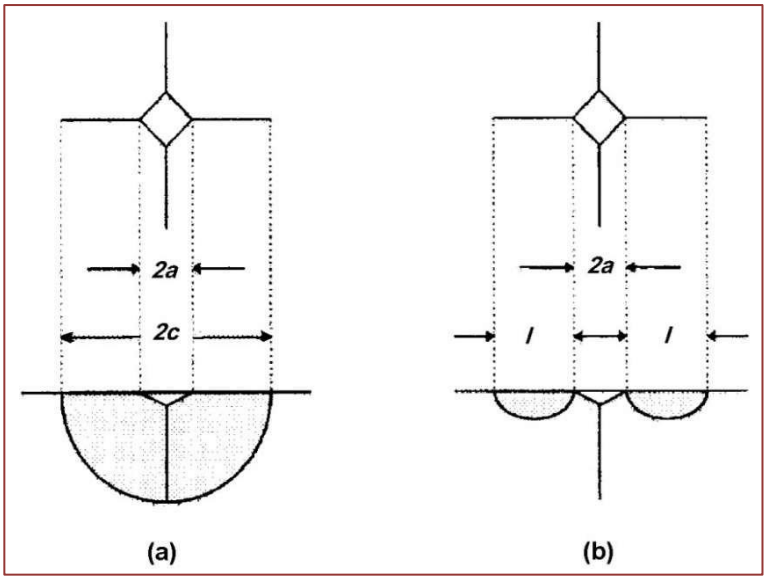
As trincas Palmqvist (Figura 4c) nucleiam-se próximas à superfície da amostra, na direção das diagonais do indentador, podendo também evoluir para propagação instável com o aumento da carga aplicada. Tanto as trincas medianas quanto as trincas Palmqvist podem originar trincas radiais superficiais, cuja dimensão é frequentemente utilizada na estimativa da tenacidade à fratura do material ensaiado (PALMQVIST, 1967).

Assim, as trincas radiais podem ser formadas a partir de um dos dois sistemas de nucleação de trinca, mediana ou Palmqvist (Figura 5), ou até mesmo pela combinação de ambos. O traço radial da trinca na superfície da amostra, por ser visível e mensurável, torna-se um importante parâmetro para a avaliação da tenacidade à fratura do material

ensaiado. A dificuldade em identificar o tipo de trinca inicial, sua geometria final e o valor do carregamento crítico constitui uma das principais limitações da utilização do ensaio de dureza na avaliação da tenacidade à fratura dos materiais. Os dois sistemas de nucleação de trincas (mediana e Palmqvist) resultam em formulações matemáticas semelhantes para a avaliação da tenacidade à fratura, baseadas nos conceitos da *MFLE*. Contudo, cada formulação utiliza diferentes expressões semiempíricas para determinar essa propriedade (LAWN & FULLER, 1975).

Apesar das limitações do método, o ensaio de dureza Vickers continua sendo amplamente empregado devido à sua simplicidade e praticidade. Mais recentemente, técnicas de simulação numérica têm sido utilizadas para analisar os campos de tensões e deformações durante a indentação, contribuindo para uma melhor compreensão dos mecanismos de nucleação e propagação de trincas, especialmente em recobrimentos superficiais e em materiais compostos (DIAS *et al.,* 2006).

Figura 5. Comparação entre os sistemas de nucleação e propagação de trincas ao redor de uma impressão Vickers: (a) radial-mediana; e, (b) Palmqvist.



3. METOLOGIA

Metodologias recentes abordam o problema da fratura em materiais estruturais por meio do acoplamento de modelos numéricos ao comportamento mecânico da estrutura. Nessa vertente, têm sido utilizados modelos discretos de elementos finitos em conjunto com conceitos de fratura e da mecânica da fratura, por exemplo, por meio do cálculo da tenacidade à fratura do material, bem como conceitos da mecânica dos meios contínuos, através da avaliação do dano (ANDERSON, 1995).

Essa abordagem vem sendo desenvolvida tanto para a análise de falhas estruturais em materiais frágeis quanto em materiais dúcteis, além de materiais compostos e em recobrimentos superficiais. Entretanto, a correta incorporação dos aspectos mecânicos e fenomenológicos inerentes à fratura em materiais constitui um fator-chave para o sucesso e a eficácia dessas metodologias aplicadas à análise numérica da integridade mecânica de

uma ampla classe de componentes estruturais e dos mais diversos materiais (CHRISTOFORO *et al*., 2016).

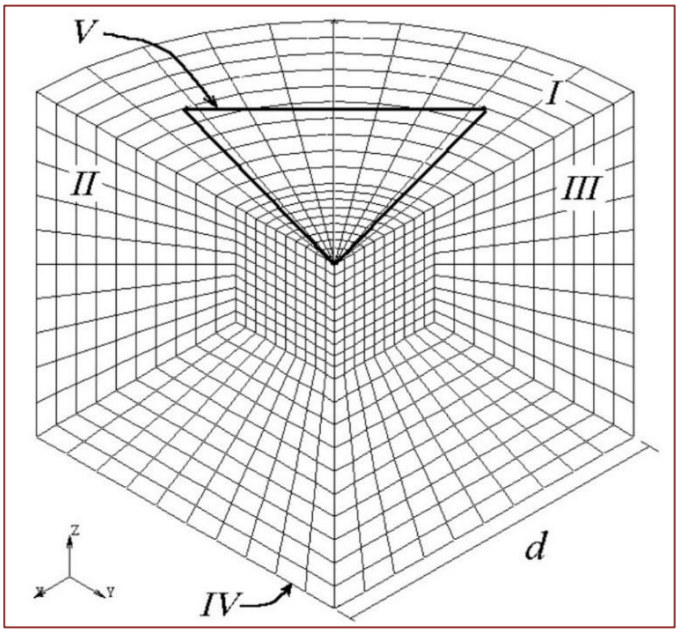
A análise numérica pode ser conduzida utilizando softwares comerciais de Elementos Finitos, como, por exemplo, o Abaqus™, o Ansys® ou o Marc™ (DIAS, 2004). Para a modelagem do ensaio de dureza Vickers por meio de modelos discretos, é necessário reproduzir o contato entre o indentador Vickers e a amostra do material em análise. O indentador pode ser modelado como uma placa rígida com base quadrada, enquanto a amostra foi modelada utilizando elementos sólidos tridimensionais de oito nós, conforme ilustrado na Figura 6.

Para o estabelecimento das condições geométricas e de contorno do problema, consideram-se simplificações com o objetivo de reduzir o tempo de processamento dos modelos numéricos, conforme descrito na literatura e apresentado na Figura 6

(DIAS, 2004, DIAS *et al.,* 2019).

Na Figura 6, as superfícies *II* e *III* apresentam restrições ao deslocamento circunferencial, em função das condições de simetria do problema. Os nós localizados na base da amostra, correspondente à superfície *IV*, possuem restrições ao deslocamento na direção da indentação (eixo z). Na região de contato da indentação, localizada no vértice da superfície *I*, busca-se utilizar uma malha mais refinada, de modo a representar de forma mais adequada o gradiente dos campos de tensões e deformações.

Figura 6. Malha tridimensional capaz de representar ¼ do ensaio Vickers.



O material da amostra estudada pode ser modelado como isotrópico, homogêneo e com comportamento elastoplástico sob compressão, sendo descrito na literatura pela expressão clássica aplicada a materiais com encruamento que seguem a relação da lei de potência de Hollomon (DIAS *et al*., 2019). Esse comportamento elastoplástico costuma ser reescrito conforme a Equação 1 e implementado em programas comerciais de elementos finitos.

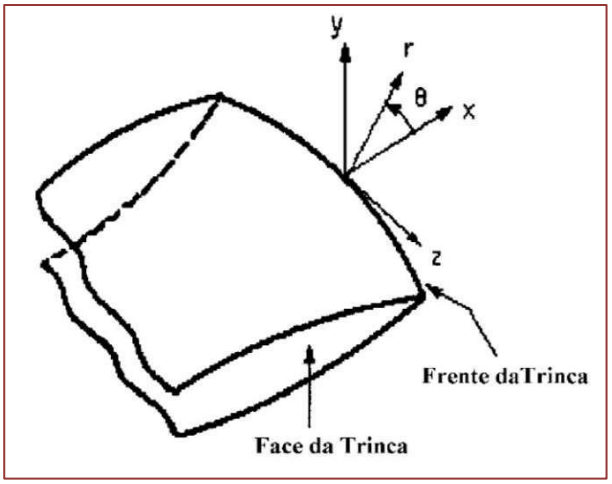
$$\sigma = \begin{cases} E\,\varepsilon^{1.0} & \text{(fase elástica)} \\ K\,\varepsilon^{n} & \text{(fase plástica)} \end{cases} \qquad (1)$$

Nessa equação, σ e ε representam, respectivamente, a tensão e a deformação efetivas. *E* corresponde ao módulo de elasticidade, K é uma constante associada às características de encruamento do material e *n* representa o coeficiente de encruamento

3.1. MODELO NUMÉRICO COM INCORPORAÇÃO DE TRINCAS.

Utilizando os conceitos da mecânica da Fratura (*MFLE*), pode-se estabelecer uma condição capaz de identificar o colapso de elementos ou nós durante a propagação de trincas no ensaio de indentação. Dessa forma, a resolução do problema de fratura através do Método dos Elementos Finitos (*MEF*) consiste na resolução de sucessivos problemas lineares, porém distintos entre si (DIAS, 2004; MEDEIROS & DIAS, 2013). Ao final de cada etapa, os valores numéricos estimados do fator de intensidade de tensões para o modo *I* de abertura de trincas (K*i*) em diferentes pontos da frente da trinca (Figura 7) são comparados com a tenacidade à fratura do material (K*ic*), estabelecendo-se, assim, o instante de crescimento da trinca.

Figura 7. Frente e face da trinca para modelos numéricos tridimensionais.

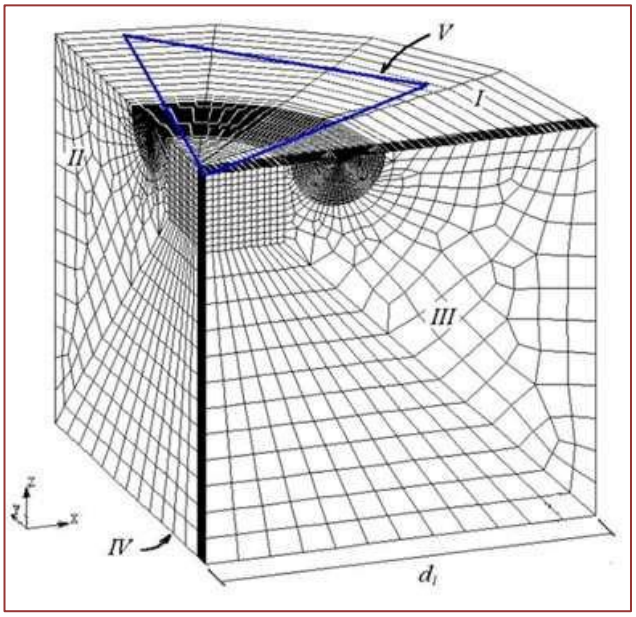


Baseando-se nos resultados experimentais da literatura e naqueles obtidos nas primeiras simulações numéricas, principalmente na análise dos campos de tensões à frente da trinca, torna-se possível identificar as regiões de provável nucleação dessas trincas radiais. Após a identificação dessas regiões, utiliza-se um procedimento de análise numérica para a simulação do ensaio de indentação com uma trinca pré-definida.

As regiões da frente e da face da trinca necessitam ser representadas por uma malha mais refinada, pois é de extrema importância o modelamento da singularidade em torno da trinca para se obter uma boa representação dos campos de tensão e de deformação ao redor da fissura. Em seguida, para representar no modelo numérico uma trinca superficial radial com geometria similar à do tipo Palmqvist, definiu-se uma geometria semicircular

para a trinca, implementada na superfície III (ou seja, na direção da diagonal do indentador), conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8. Malha capaz de modelar o ensaio de indentação Vickers incorporando uma trinca radial superficial semicircular (Palmqvist).



3.2. TÉCNICA VIRTUAL DE FECHAMENTO DE TRINCA (VCCT)

A Técnica Virtual de Fechamento de Trinca (Virtual Crack Closure Technique - VCCT) é um dos métodos mais robustos e amplamente utilizados na mecânica da fratura computacional para simular a propagação de trincas e a delaminação de materiais, especialmente em materiais compostos, utilizando o MEF.

Essa técnica baseia-se na Terceira Lei de Newton e no princípio de liberação de energia proposto por Irwin (ANDERSON, 1995). Segundo esse princípio, a energia necessária para promover a abertura de uma trinca por uma distância infinitesimal Δa é equivalente ao trabalho necessário para fechar essa mesma trinca até sua posição original.

Dessa forma, o VCCT permite determinar a taxa de liberação de energia associada à propagação da trinca a partir das forças nodais e dos deslocamentos obtidos na análise por elementos finitos, sendo amplamente empregado na avaliação de processos de delaminação e falha em materiais compostos (CHRISTOFORO et al., 2016; SUN et al., 2018).

Em vez de calcular diretamente os fatores de intensidade de tensão (KI) a partir do campo de tensões, que apresenta singularidade e elevada dependência do refinamento da malha na ponta da trinca, a VCCT determina a Taxa de Liberação de Energia Interfacial (G) utilizando as forças nodais e os deslocamentos dos nós adjacentes (CHRISTOFORO et al., 2016; SUN et al., 2018). Embora seja necessário um refinamento adequado da malha na região da ponta da trinca, o cálculo de G por meio da VCCT apresenta sensibilidade significativamente menor ao tamanho dos elementos quando comparado ao cálculo direto de KI a partir das tensões nodais.

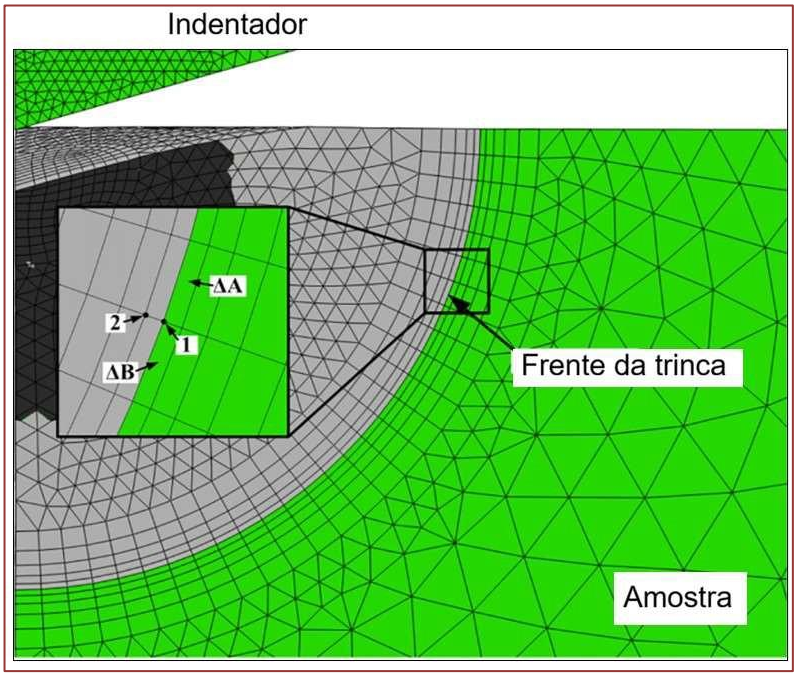
A propagação da trinca ocorre quando a taxa de liberação de energia calculada (G) atinge a energia crítica de fratura do material (GC), parâmetro associado à resistência do material à propagação de trincas e relacionado à tenacidade à fratura (KIC), conforme apresentado na Equação 2.

$$G_C = \frac{K_{IC}^2(1-\nu^2)}{E} \qquad (2)$$

Como as trincas se propagaram ao longo das diagonais da impressão do indentador Vickers, pôde ser adotado um modelo de fratura com simetria de ¼. As trincas foram inicialmente modeladas como do tipo radial-mediana, assumindo geometria semicircular. Ao longo da frente de trinca, utilizou-se elemento cúbico de oito nós. A malha empregada no modelo de fratura do ensaio Vickers é apresentada na Fig. 9.

A simulação pode ser realizada em três etapas: carregamento do indentador Vickers; descarregamento do indentador; e, abertura da trinca. Nas duas primeiras etapas, a superfície da trinca foi definida como plano de simetria, juntamente com a região não trincada pertencente ao plano mostrado na Figura 9. Na terceira etapa, a região interna correspondente à frente de trinca previamente definida foi convertida em superfície livre, permitindo deslocamentos nodais perpendiculares à superfície da trinca sob o campo de tensões gerado pela indentação. Simultaneamente, os deslocamentos nodais através da superfície da trinca permaneceram restringidos, enquanto a região não trincada continuou sendo tratada como plano de simetria (SUN et al., 2018).

Figura 9. Esquema da aplicação da técnica VCCT no ensaio Vickers utilizando elementos cúbicos de oito nós.



Após a simulação, os valores da taxa de liberação de energia G na face da trinca podem ser determinados por meio da técnica VCCT. Conforme ilustrado na Figura 9, em que ΔA e ΔB

representam as áreas virtualmente fechadas dos dois quadriláteros adjacentes dos elementos cúbicos, pode ser obtida através Equação 3 a partir da força F aplicada no nó 1 e do deslocamento u do nó 2, ambas perpendiculares à superfície da trinca (SUN et al., 2018).

$$G = \frac{2F \cdot u}{\triangle A + \triangle B} \qquad (3)$$

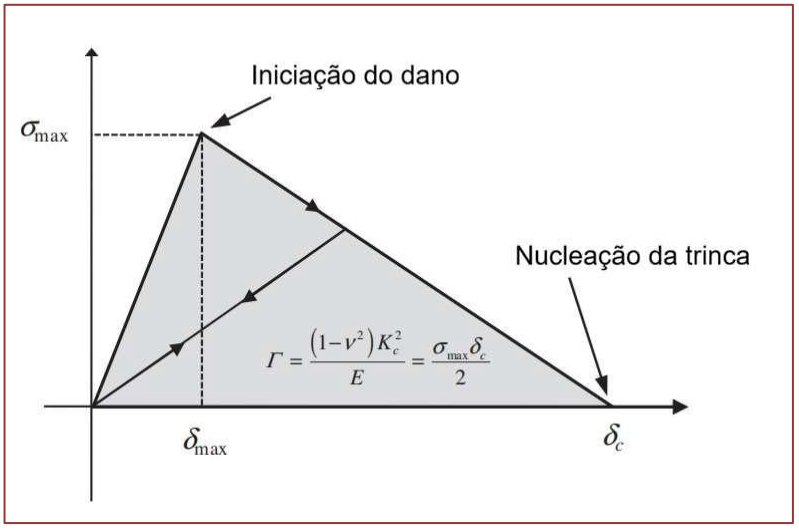
A VCCT tem se destacado como uma das ferramentas mais populares e eficientes para a determinação aproximada dos valores da taxa de liberação de energia (G), principalmente devido à sua simplicidade, eficiência e robustez na análise de problemas de propagação de trincas (XIE & BIGGERS, 2006). Entretanto, apesar dessas vantagens, tais análises geralmente apresentam alto custo computacional.

3.3. MODELO DE ZONA COESIVA PARA SIMULAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DE TRINCAS

O modelo de zona coesiva para simulação de trincas (Cohesive Zone Model – CZM) é uma das abordagens mais recentes utilizadas para a simulação numérica da propagação de trincas, delaminação e falha interfacial em materiais frágeis, quase frágeis e em materiais compostos. Esse modelo é amplamente empregado em conjunto com métodos numéricos, como o (MEF e o Método Estendido dos Elementos Finitos (XMEF), entre outros (FUKUMASU; SOUZA, 2014; HYUN et al., 2014).

O processo de trincamento pode ser simulado pela introdução de uma interface coesiva de espessura nula no plano de potencial formação da trinca. O comportamento dos elementos coesivos presentes nessa interface é governado por uma lei tração-separação, composta por uma região elástica linear-frágil, responsável por fornecer uma complacência adicional ao modelo de elementos finitos antes do início do dano, e por uma região de amolecimento (softening), que descreve a degradação progressiva da rigidez sob carregamento adicional (Fig. 10).

Figura 10. Lei tração-separação aplicada à simulação de trincas.



Assim, a tração coesiva entre os nós dos elementos aumenta com o deslocamento relativo entre os nós até o ponto em que a separação entre as duas superfícies coesivas atinge um valor crítico (δmax). Após ultrapassar o valor de δmax, a tração coesiva decresce até zero. Como os resultados obtidos pelo método dos elementos finitos são pouco sensíveis à forma da lei tração-separação, pode-se assumir a forma bilinear apresentada na Fig. 10.

Essa lei tração-separação é definida por três parâmetros principais: a tensão de iniciação do dano (σmax), o deslocamento correspondente ao início do dano (δmax) e o deslocamento de falha (δc), a partir do qual a tração se torna nula e ambos os lados da interface passam a se mover independentemente um do outro (HYUN et al., 2014).

Porém, o modelo CZM apresenta algumas limitações, como a escolha inadequada da energia de fratura (GC), a utilização de elementos coesivos sem configuração de dano, a ausência de critérios de falha para o material contínuo e a definição incorreta da direção dos elementos coesivos. Além disso, esse modelo numérico apresenta elevado custo computacional.

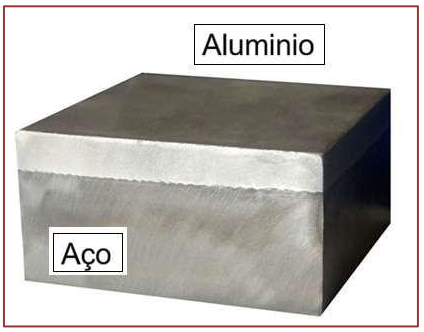
3.4. NOVOS PROCESSOS, NOVOS MATERIAIS E NOVAS SIMULAÇÕES DE TRINCAS

O processo de fabricação por explosão, conhecido como Cladeamento de Alumínio em Aço por Soldagem por Explosão (Aluminum-to-Steel Cladding by Explosive Welding – CEW), é uma técnica avançada capaz de unir materiais metálicos distintos, inclusive combinações consideradas difíceis ou inviáveis através dos métodos convencionais de soldagem, como, por exemplo, aço e alumínio (CARVALHO et al., 2018).

A principal característica dessa técnica é a realização da união no estado sólido, evitando problemas típicos da soldagem por fusão, como a formação excessiva de compostos intermetálicos frágeis, trincas térmicas e diferenças acentuadas nos coeficientes de expansão térmica. Por esse motivo, a soldagem por explosão (CEW) é amplamente utilizada no revestimento metálico (cladeamento) e na fabricação de chapas bimetálicas aplicadas nas indústrias petroquímica, naval, aeroespacial e de geração de energia.

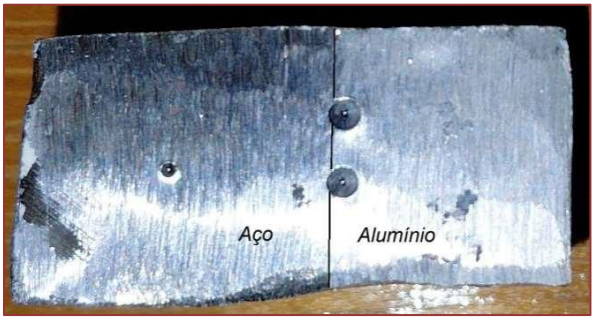
Na união entre aço e alumínio, por exemplo, o processo permite combinar a elevada resistência mecânica e o baixo custo do aço com a baixa densidade e a elevada resistência à corrosão do alumínio (Figura 11). A interface formada geralmente apresenta uma morfologia ondulada característica, resultante das altas velocidades de impacto durante a colisão (CARVALHO et al., 2018). Entretanto, um dos principais desafios consiste na avaliação das propriedades mecânicas dessa interface, como sua adesão e sua tenacidade à fratura (KIC).

Figura 11. Imagem de uma peça de alumínio com aço produzido por CEW.



Nesse contexto, propõe-se a realização de estudos utilizando ensaios de dureza com indentadores piramidais, como o Vickers ou o Canto de Cubo (Cube Corner). Basicamente, a principal diferença entre esses indentadores está no ângulo de abertura entre faces opostas, sendo de 136° para o Vickers (Figura 12) e de 90° para o Canto de Cubo. A Figura 12 ilustra a realização de indentação na interface entre o aço e o alumínio em uma amostra bimetálica. Após a definição do tipo de indentador, determina-se uma carga capaz de produzir trincas radiais no ensaio experimental e, posteriormente, simula-se esse mesmo ensaio por meio dos modelos de elementos finitos anteriormente mencionados, iniciando-se pelos modelos numéricos mais simples com incorporação de trincas até os mais sofisticados (VCCT e CZM).

Figura 12. Indentação na região da interface em uma amostra bimetálica de aço e alumínio.



Dessa forma, no presente trabalho propõe-se uma combinação de metodologias numérico-experimentais confiáveis e, preferencialmente, de baixo custo, capazes de determinar o comportamento mecânico desse material composto, com o objetivo de estimar a tenacidade à fratura da interface e, consequentemente, a adesão entre o alumínio e o aço.

4. RESULTADOS ESPERADOS E CONCLUSÕES

Atualmente, observa-se uma forte tendência à utilização da simulação numérica na solução de inúmeros problemas tecnológicos, permitindo a otimização e o desenvolvimento de projetos de engenharia. Metodologias recentes abordam problemas

de falha estrutural por meio do acoplamento entre modelos numéricos e o comportamento macroscópico das estruturas. Nesse contexto, têm sido empregados modelos discretos de elementos finitos associados aos conceitos da mecânica da fratura e da mecânica dos meios contínuos, por meio da avaliação do dano estrutural. Contudo, a correta incorporação dos aspectos mecânicos e fenomenológicos inerentes aos mecanismos de falha constitui fator essencial para o sucesso e a eficácia dessas metodologias preditivas aplicadas à análise numérica da integridade mecânica de uma ampla classe de componentes estruturais e diferentes tipos de materiais, tais como materiais frágeis, dúcteis, compósitos e revestimentos (MEDEIROS et al., 2012; CATALANOTTI et al., 2013).

O principal objetivo deste trabalho é apresentar metodologias rápidas e confiáveis, com moderado custo computacional, combinando análises numéricas e dados experimentais para determinar o comportamento mecânico de materiais compostos, incluindo materiais metálicos, frágeis, compósitos laminados ou híbridos, estruturas sanduíche e recobrimentos superficiais finos. Na simulação de ensaios de indentação, podem ser avaliados os processos de falha desses materiais por meio de modelos de dano que incorporam conceitos da mecânica dos meios contínuos, da mecânica da fratura e da mecânica da fratura finita, permitindo compreender os mecanismos de nucleação e propagação de falhas estruturais (DIAS & GODOY, 2010; MEDEIROS et al., 2012).

Dessa forma, torna-se possível reproduzir numericamente o comportamento desses materiais em condições reais de serviço, como, por exemplo, no emprego de compósitos laminados em pás de aerogeradores. Além disso, podem ser desenvolvidos parâmetros numéricos representativos de limiares de interesse tecnológico, abaixo dos quais não ocorreria propagação de trincas adesivas ou coesivas (CHAVES FILHO & DIAS, 2019). Como exemplo, destaca-se a avaliação da vida útil de ferramentas de corte recobertas com filmes cerâmicos, utilizando procedimentos não destrutivos baseados em ensaios de dureza capazes de determinar a tenacidade à fratura desses recobrimentos superficiais. Ademais, a metodologia proposta pode ser aplicada ao estudo de novos processos e materiais, como os compostos bimetálicos produzidos pela técnica CEW.

Por fim, destaca-se como objetivo adicional o desenvolvimento científico e tecnológico, bem como a formação de recursos humanos voltados à otimização de procedimentos numérico-experimentais, ao estudo de novos processos e à possível geração de patentes. Uma vez que essa linha de pesquisa integra ensaios experimentais e análises numéricas, espera-se a redução dos custos associados aos procedimentos experimentais e, consequentemente, a otimização de projetosestruturais.

REFERÊNCIAS

[1] ANDERSON, T. L., Fracture Mechanics, Fundamentals and Applications. 2 Ed., CRC Press, Inc., 1995, 688p.

[2] ARAÚJO, A.E.F.; SILVA, E.C.; DIAS, A.M.S.; SILVA, L.C.F. Estudo de um compósito particulado de matriz polimérica com endocarpo do Cocos Nucifera Linn. fabricado por extrusão. Matéria (Rio de Janeiro), v. 31, ISSN 1517-7076 articles e20260143, 2026. DOI: https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT- 2026-0143

[3] CALLISTER JUNIOR, W.D.; RETHWISCH, D.G. Fundamentos da ciência e engenharia de materiais: uma abordagem integrada. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

[4] CARVALHO, G.H.S.F.L., GALVÃO, I., MENDES, R., LEAL, R.M., LOUREIRO, Explosive welding of aluminium to stainless steel. Journal of Materials Processing Tech, 262, p.340-349, 2018.

[5] CATALANOTTI, G., CAMANHO, P. P., MARQUES, A. T. Three-dimensional failure criteria for fiber-reinforced laminates Composite Structures. Composite Structures, 95, p.63-79, 2013.

[6] CHAVES FILHO, O.F.; DIAS, A.M.S. Avaliação dos processos de fratura em filmes finos através da simulação de ensaios de Indentação com penetradores esféricos. Matéria (Rio de Janeiro), v. 24, ISSN 1517-7076 articles e20260143, 2026.

[7] CHRISTOFORO, A.L., SILVEIRA, M.E., DIAS, A.M.S., ARAUJO, V.A., LAHR, F.A.R. Numerical Study of Finite Fracture Growth in an Epoxy Resin. International Journal of Materials Engineering 2016, 6(1): 15-21 DOI: 10.5923/j.ijme.20160601.03

[8] DIAS, A.M.S., Análise Numérica do Processo de Fratura no Ensaio de Indentação Vickers em uma Liga de Carboneto de Tungstênio com Cobalto. Tese de Dr., Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2004.

[9] DIAS, A.M.S., MODENESI, P.J., GODOY, G.C. Computer Simulation of Stress Distribution During Vickers Hardness Testing of WC-6Co. Materials Research, v. 9, n. 1, p. 73–76, 2006. DOI: 10.1590/S1516-14392006000100014

[10] DIAS, A. M. S., GODOY, G. C. Determination of Stress-strain Curve Through Berkovich Indentation Testing. Materials Science Forum, 636-637, p. 1186- 1193, 2010.

[11] DIAS, A.M.S., SILVA, E.C., LIBÓRIO, M.S. Experimental-numerical Technique to Evaluate the Thickness of TiN Thin Film. Materials Research. 2019; 22(5): e20180283. DOI: http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2018-0283

[12] EVANS, A.G., CHARLES, E.A. Fracture Toughness Determinations by Indentations. Journal of American Ceramic Society. 59, p371-372, 1976.

[13] FUKUMASU, N.K., SOUZA, R.M. Numerical evaluation of cohesive and adhesive failure modes during the indentation of coated systems with compliant substrates. Surface & Coatings Technology, 260, p.266-271, 2014.

[14] HYUN, H.C., RICKHEY, F., LEE, J.H., HAHN, J.H., LEE, H. Characteristics of indentation cracking using cohesive zone finite element techniques for pyramidal indenters. International Journal of Solids and Structures, 51, p.4327-4335, 2014.

[15] LARSSON, P., GIANNAKOPOULOS, A. E. Tensile Stress and their Implication to Cracking at Pyramid Indentation of Pressure-sensitive Hard Metals and Ceramics. Materials Science and Engineering, A254, p268-281, 1998. www.elsevier.com/locate/

[16] LAWN, B.R., FULLER, E.R. Equilibrium Penny-like Cracks in Indentation Fracture. Journal of Materials Science, 10, p2016-2024, 1975.

[17] MARSHALL, D.B., LAWN, B.R., EVANS, A.G. Elastic/Plastic Indentation Damage in Ceramics: The Lateral Crack System. Journal of the American Ceramic Society, v. 65, no 11, p561-566, Nov 1982.

[18] McCOLM, I. J. Ceramic Hardness. Editora Plenum Press, London, 1990, 324p.

[19] MEDEIROS, E.E., DIAS, A.M.S., CHRISTÓFORO, A.L. Numerical Simulation of Mechanical Fracture Testing. Int. Journal of Materials Engineering, 2 (5), p.61-66, 2012.

[20] MEDEIROS, E.E., DIAS, A.M.S. Experimental and Numerical Analysis of Vickers Hardness Testing. International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences, v. 17, p. 9-18, 2013.

[21] PALMQVIST, S. Method of Determining the Toughness of Brittle Materials, Particularly Sintered Carbides. Jern Kontorets Annaleln, 141, (5), p300, 1957 & 167, p.208, 1963.

[22] PONTON, C.B., RAWLINGS, R.D. Vickers Indentation Fracture Toughness Test, Part 2: Application and Evaluation of Standardized Indentation Toughness Equations. Materials Science and Technology, v. 5, p.961- 976,1989.

[23] SHACKELFORD, J.F. Ciência dos materiais. 6. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

[24] SOUZA, S.A. Ensaios Mecânicos de Materiais Metálicos: Fundamentos teóricos e práticos. Ed. Edgard Blücher LTD. 5a Ed. 2000.

[25] SUN, L., MA, D., WANG, L., SHI, X., WANG, J., CHEN, W. Determining indentation fracture toughness of ceramics by finite element method using virtual crack closure technique. Engineering Fracture

Mechanics, 197, p. 151- 159, 2018. 10.1016/j.engfracmech.2018.05.001

[26] SZUTKOWSKA, M. Fracture Toughness Measurement of WC-Co Hard-metals by Indentation Method. Journal of Advanced Materials, 31: (3), Jul 1999.

[27] XIE, D., BIGGERS JR, S.B. Progressive Crack Growth Analysis Using Interface Element Based on the Virtual Crack Closure Technique. Finite Elements in Analysis and Design, 42, 977-984(2006). doi: 10.1016/j.finel.2006.03.007

[28] ZENG, K., CHIU, C-h. An Analysis of Load-Penetration Curves from Instrumented Indentation. Acta Materialia, 49, p3539-3551, 2001. www.elsevier.com/locate/actamat

Capítulo 4

Desenvolvimento e caracterização de briquetes lignocelulósicos produzidos por batelada hermética utilizando resíduos alimentícios como aglutinantes

Leoncio Diogenes Tavares Camara
Philipe Lopes Jurge Tardin
Felipe Bicalho Azeredo da Silva

Resumo: A briquetagem de resíduos lignocelulósicos constitui uma alternativa promissora para o aproveitamento energético de biomassa residual e para a redução da dependência de combustíveis fósseis. Neste trabalho foi desenvolvida e avaliada uma técnica inovadora de produção de briquetes denominada briquetagem por batelada hermética, caracterizada pela compactação da biomassa em sistema fechado, permitindo a manutenção da umidade e do vapor d'água durante o processo de conformação. Foram produzidos briquetes a partir de resíduos de madeira e resíduos alimentícios utilizados como aglutinantes, sendo avaliadas diferentes composições e condições operacionais. A caracterização dos produtos foi realizada por análise termogravimétrica (TG), análise termogravimétrica derivativa (DTG), calorimetria exploratória diferencial (DSC) e espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), com comparação aos briquetes comerciais Tramontina e à lenha de eucalipto. Os resultados demonstraram que os briquetes produzidos apresentaram boa estabilidade física e elevada compactabilidade. As análises de FTIR confirmaram a presença predominante de constituintes lignocelulósicos e mostraram elevada similaridade química entre os briquetes produzidos, o briquete comercial e a lenha de eucalipto. Os resultados indicam que a técnica de briquetagem por batelada hermética possui potencial para a produção de biocombustíveis sólidos de qualidade, utilizando resíduos lignocelulósicos e alimentícios como matérias-primas de baixo custo e elevada disponibilidade.

1. INTRODUÇÃO

A utilização de briquetes de materiais orgânicos lignocelulósicos tem sido uma alternativa muito utilizada na geração de energia renovável, principalmente, num contexto atual de redução de fontes energéticas provenientes de matérias primas fósseis, os quais tem relação direta com efeitos de aquecimento global na atmosfera (Efeito estufa).

De acordo com o CETEM (Centro de Tecnologia Mineral), a briquetagem consiste na aglomeração de partículas finas por meio de pressão, com auxílio ou não de um aglutinante, o qual leva à obtenção de um produto não só compactado, mas também com forma, tamanho e parâmetros mecânicos adequados. Os briquetes, geralmente, são produzidos de resíduos orgânicos, podendo ser produzidos também a partir de resíduos de carvão e de limalhas de metais, estes últimos em menor percentual. Os materiais mais utilizados, atualmente, para se produzir briquetes de origem orgânica, são os resíduos de madeira, de produção agrícola e também os resíduos sólidos urbanos (Gonçalves et al, 2009). Outra técnica similar ao processo de briquetagem e o de peletização, para a produção de peletes, que são produtos com densidade e dimensões menores que os briquete.

Dias et al., (2012) realizaram um estudo de como se produzir briquetes e péletes utilizando resíduos agroflorestais, os quais apresentam cálculos da disponibilidade de matéria-prima, como resíduos de cana-de-açúcar, resíduos de milho, resíduos de arroz, resíduos de trigo, resíduos de café, resíduos de algodão, etc. O trabalho também mostra aspectos técnicos da briquetagem e da peletização de resíduos agroflorestais e agroindustriais, como pré-tratamento da matéria-prima, armazenamento primário e intermediário da matéria prima, alimentação da biomassa no sistema de compactação, equipamentos de compactação para a produção de briquetes ou de péletes, comparação entre peletizadoras e briquetadeiras, etc. O trabalho também especifica normas e especificações para análise de briquetes e péletes.

Silva et al. (2015) realizaram caracterizações de briquetes a partir de quatro diferentes biomassas residuais provenientes de serragem de Eucalyptus, serragem de Pinus, bagaço de cana-de-açúcar e palha de cana-de-açúcar. Os resíduos foram tratados para que obtivessem 12% de umidade e uma granulometria inferior a 1,70 mm. Os autores produziram 15 briquetes para cada tipo de matéria prima. A pressão utilizada foi de 1250 $kgf.cm^2$ durante 30 segundos. Os briquetes obtidos apresentaram densidades na faixa de 0,88 a 1,11 $g.cm^3$, o que representa uma redução de volume entre 5 a 14 vezes o volume original. Os poderes caloríficos obtidos foram de 15.63 $J.kg^{-1}$, 18.54 $J.kg^{-1}$, 19.18 $J.kg^{-1}$, 20.32 $J.kg^{-1}$ para palha de cana, bagaço de cana, serragem de eucalipto e pinus, respectivamente. A caracterização dos briquetes produzidos a partir de diferentes tipos de biomassa mostrou o potencial destas matérias primas para a produção de briquetes lignocelulósicos.

Matus et al. (2015) mostraram que o teor de umidade do briquete é um parâmetro limitante que influencia na qualidade deste biocombustível sólido. Esta característica tem Influencia no poder calorífico, densidade, resistência mecânica e estabilidade dimensional, afetando também o processo de produção. Os autores produziram os briquetes utilizando uma prensa de pistão hidráulico à temperatura ambiente. O efeito do teor de umidade nas propriedades (densidade, resistência mecânica etc) dos briquetes foi estudado, sendo otimizada a concentração de água a fim de obter um produto final de melhor qualidade. Foi determinado um teor ótimo de umidade de 12% para o processo de briquetagem.

Emerhi (2011) realizou estudos para avaliar o poder calorífico dos briquetes produzidos a partir de misturas de serragens de três espécies de madeiras tropicais (Afzelia africana, Terminalia superba, Melicia Elcelsa), as quais foram misturadas com diferentes aglutinantes (amido, esterco de vaca e cinzas de madeira). Os aglutinantes foram misturados nas seguintes proporçôes: 70/30% para esterco de vaca com, cinzas de madeira, e 70/15%, com amido, sendo a serragem misturada na proporção de 50/50% para cada combinação de briquete produzido. Os resultados mostraram que os briquetes produzidos com maior poder calorífico (33,116kcal/g) foram os obtidos a partir das matérias primas Afzelia africana e Terminalia combinadas com amido. O poder calorífico dos briquetes produzidos a partir da Afzelia Africana e Terminalia, combinadas com cinzas, foi menor, em torno de 23,991kcal/g.

Dos Santos et al. (2011) realizaram experimentos de termogravimetria, TG, DTG e DTA, do bagaço de cana moído e determinaram as faixas de temperaturas nos estágios de perda de umidade e decomposição da matéria, este último em termos da perda de massa de celulose, hemicelulóse, lignina. Desta forma, conseguiram obter parâmetros que permitem caracterizar uma matéria prima lignocelulósica de uma forma qualitativa, podendo, em alguns casos, obter, quantitativamente, a composição de celulose, hemicelulose e lignina presentes.

Krizan et al. (2012) avaliaram os parâmetros de processo na fabricação de briquetes utilizando diferentes métodos de pré-tratamento (trituração, secagem etc). Eles constataram que a qualidade final do briquete depende tanto da composição básica da matéria prima quanto dos parâmetros tecnológicos, como a granulometria da matéria prima, temperatura, pressão de compactação e também umidade do material. A qualidade final de briquetes foi avaliada em termos da densidade e resistência mecânica dos briquetes de acordo com os padrões europeus aplicados para biocombustíveis sólidos de alta qualidade.

Araújo et al. (2013) realizaram estudos de viabilidade na produção de briquetes a partir de resíduos de podas de árvores e folhagens, como fonte alternativa de energia. Devido a grande disponibilidade de matéria prima, os custos de produção são menores, uma vez que todo o material usado no processo pode ser adquirido nos aterros de podas. A utilização de resíduos orgânicos de podas para a produção de briquetes apresenta benefícios ambientais devido à diminuição dos resíduos destinados a aterros sanitários. Os briquetes produzidos a partir destas matérias primas apresentaram potencial para a produção de energia, com alto índice de poder calorifico, inclusive superior ao da lenha.

Neste trabalho foi desenvolvido um sistema de briquetagem não estudado anteriormente, que é o de produção de briquetes por batelada hermética. O aparato experimental desenvolvido foi estudado buscando a produção de briquetes com qualidade e estabilidade, sendo avaliados a partir do tipo de matéria prima, teor de umidade, condições de processo e tipo de aglutinante.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A extrusão convencional e a extrusão RAM (extrusão acionada por um pistão hidráulico) são os processos mecanizados mais utilizados, atualmente, para a produção de briquetes, os quais demandam grandes quantidades de energia para manter elevadas pressões e temperaturas, necessárias nesses equipamentos.

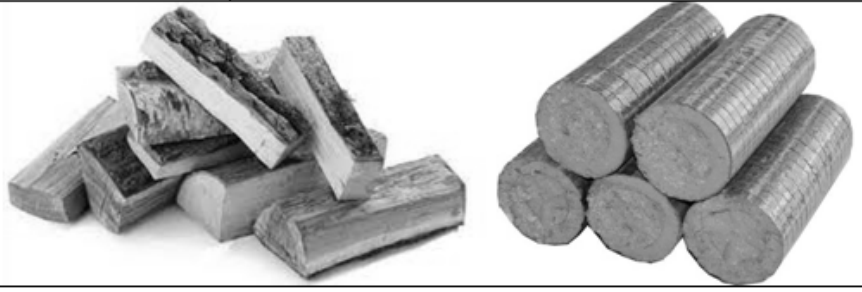
Os sistemas de extrusão convencional e extrusão RAM consistem em processos mecânicos de produção semicontínuos, em que o material é pressionado, através de uma matriz geralmente tubular, por um dispositivo do tipo parafuso ou pistão, respectivamente, levando à compactação da matéria prima e formação do produto, geralmente cilíndrico, que é cortado no tamanho mais adequado à sua armazenagem. No processo de briquetagem, estes sistemas são utilizados para produzir briquetes com características distintas. Briquetes produzidos pelo sistema de extrusão são menores e podem possuir ou não furos no seu centro, geralmente com perfis cilíndricos. Já os briquetes produzidos pelo sistema de extrusão RAM são maiores e podem possuir diversos tipos de perfis, determinados pela matriz a ser utilizada.

No Brasil, a Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), regulamentou uma padronização para algumas características dos briquetes, na qual define que um briquete deve ter uma densidade média entre 650,0 kg/m^3 (0,65 g/cm^3) e 1200,0 kg/m^3 (1,2 g/cm^3) e dimensões mínimas aproximadas de 60,0 mm de diâmetro e entre 25,0 mm e 300,0 mm de comprimento.

As principais características dos briquetes comerciais, que demonstram suas vantagens de uso em relação à lenha convencional, são descritas na Figura 1:

Figura 1 - Comparação entre a lenha e o briquete comercial

Características	Lenha	Briquete
Poder calorífico	Baixo, 1700 - 2500 kcal/kg	Alto, 4000 - 4800 kcal/kg
Umidade	Alta, 20-45%	Baixa, 8-12%
Rendimento	Irregularidade térmica e baixa uniformidade da chama	Regularidade térmica e alta uniformidade da chama
Resíduos de cinzas, fuligem ou fumaça	Alto volume	Baixo volume
Manuseio	Difícil, por não existir uniformidade	Fácil, por ser padronizado
Armazenamento	Ocupa grande espaço	Ocupa pequeno espaço
Higiene e limpeza	Sujeira, umidade, insetos e contaminação	Limpos, secos, sem insetos e contaminação
Licença ambiental	Necessidade de licenciamento (com taxas)	Sem fiscalização (sem taxas)
Comercialização	Por m³ (impreciso)	Por peso (exato)



Para a produção dos briquetes foi necessário o desenvolvimento de um reator, equipamento chamado de briquetador por batelada hermética, o qual pode ser observado na Figura 2, abaixo. Uma característica importante, do reator de batelada hermética (Briquetador), é a de manter a umidade constante durante a produção do briquete, impedindo a saída da umidade do sistema. A pressão de compactação do material era obtida através de uma prensa convencional, com a temperatura determinada pelo set-point do controlador do forno, o qual era inserido o reator.

Figura 2 - Briquetador por batelada hermética

Os briquetes analisados neste trabalho foram produzidos a partir de resíduos de madeira (lignocelulósicos) utilizando resíduos orgânicos alimentícios como aglutinantes. O material lignocelulósico era classificado de acordo com a granulometria sendo, posteriormente, misturado ao aglutinante alimentício que era, previamente, triturado a fim de se obter uma pasta homogênea.

Vale enfatizar as características da técnica desenvolvida, denominada de "briquetagem por batelada hermética", as quais consistem em compactar e aglutinar os resíduos orgânicos, principalmente, os de madeira, com o uso de um pistão/êmbolo. Este último impõe uma pressão de compactação à mistura (resíduos de madeira e alimentícios, além de óleo e água) o que proporciona uma vedação em conjunto com o molde do briquete, o que mantém o vapor d'água no sistema. O vapor d'água, em condições de pressão e temperatura, provavelmente, atua como um agente carreador da lignina do interior das partículas de madeira (lignocelulósico) para a sua superfície, favorecendo a aglutinação destas, o que confere forma e estabilidade do briquete formado.

Os parâmetros de operação mínimos para produção de briquetes com resistência mecânica mínima e uma densidade média seca de 0,8 g/cm^3, devem ser de:

- Pressão de compactação entre 2,0 MPa e 3,0 MPa;
- Temperatura de aquecimento do molde entre 160ºC e 180ºC;
- Tempo de compactação / aglutinação entre 5 minutos e 15 minutos.

Observa-se que os valores descritos acima, para a pressão de compactação e temperatura de aquecimento do molde, podem ser aumentados, com o objetivo de se produzir briquetes de densidade seca média maior e/ou para se reduzir o tempo de compactação/aglutinação ou tempo de produção do briquete.

Já o percentual de peso ideal dos componentes da mistura para um briquete ser produzido, pela técnica de "briquetagem por batelada hermética", deve ser em torno de:

a) Entre 40% e 100% em peso de resíduos de madeira (e/ou materiais lignocelulósicos) de alta e/ou baixa granulometria;

b) Entre 0% e 60% em peso de resíduos alimentícios;

Tais porcentagens, expressas em peso úmido natural, ou peso seco com umidade residual, do total de matéria prima da mistura.

Na mistura também podem ser adicionados aditivos para melhorar a queima, a exemplo dos resíduos de óleos de frituras, utilizados com uma quantidade ideal entre 5,0 ml e 25,0 ml para cada 130,0 g de massa da mistura total.

Deve-se enfatizar que, no processo de briquetagem, sem a presença de resíduos alimentícios na mistura, deve-se adicionar água em proporção entre 4% e 20% do peso dos resíduos de madeira. Já com a presença de resíduos alimentícios na mistura, deve-se adicionar a água em mesma proporção de massa dos resíduos alimentícios, devendo, os mesmos, serem liquidificados para uma melhor homogeneidade da mistura. Além disso, na preparação da mistura de material, pode-se utilizar resíduos alimentícios, previamente, cozidos ou não.

Após a produção dos briquetes, os mesmos devem ser estocados para a retirada do excesso de umidade contida neles, sendo essa etapa essencial para se ter um produto com melhor desempenho na queima. O tempo médio para a estocagem de um briquete, em contato direto com o ambiente, varia de um a cinco dias, dependendo do clima. Já para estocagem em estufa, em uma faixa de temperatura entre 80,0ºC e 100,0ºC, o tempo médio varia de 12 a 24 horas. Após o período de estocagem, os briquetes podem ser armazenados por tempo indeterminado até sua utilização para queima.

A análise térmica foi um dos métodos utilizados na caraterização dos briquetes produzidos, sendo estes resultados também comparados com análises de briquetes comerciais, como os da Tramontina. O equipamento utilizado de análise térmica utilizado foi o Analisador Térmico Perkin Elmer STA 6000. Este equipamento utiliza técnicas de TG (Análise Termogravimétrica), DTG (Análise Termogravimétrica Derivativa) e DSC (Análise de Calorimetria Exploratória Diferencial).

Primeiramente, as amostras dos briquetes eram trituradas, com granulometria próxima de um pó, e inseridas na câmara de análise do equipamento, sendo, posteriormente, determinada padrão de aquecimento do método a ser utilizado (TG, DTG ou DSC). Os ensaios foram repetidos cinco vezes para cada amostra de briquete. Vale ressaltar que a rampa de aquecimento utilizada em todos os ensaios foi de 5°C/min e que a temperatura final definida para o primeiro ensaio de cada amostra foi de 700°C, o qual foi considerado como triagem. Nos ensaios subsequentes a temperatura final definida foi de 550°C.

A análise por infravermelho, feita pelo método de refletância total atenuada, também foi utilizada na caracterização. Ela consiste na incidência de raios, no espectro de infravermelho, sobre a superfície do material, com posterior detecção através de detectores. Esta análise tem a finalidade de avaliar grupos funcionais e a composição da amostra, sendo ela efetuada antes e depois da queima da amostra. Na análise de infravermelho foi utilizado o analisador de infravermelho Perkin Elmer FT-IR Frontier. O analisador é conectado a um computador com o software de controle e aquisição de dados. Esse equipamento pertence ao Laboratório de Biomateriais do Instituto Politécnico de Nova Friburgo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Abaixo, na Figura 3, temos apresentadas algumas amostras dos briquetes produzidos pela nova técnica de batelada hermética, utilizando diferentes matérias primas, com diferentes granulometrias, condições de processo etc. A técnica desenvolvida mostrou potencial na fabricação de briquetes de diferentes granulometrias, com a utilização de aglutinantes alimentícios ou não. Os briquetes produzidos mostrarem boa compactabilidade e boa estabilidade para armazenamento, em ambientes controlados ou não.

Figura 3- Amostras dos briquetes produzidos pela nova técnica

A Tabela 1 seguinte apresenta os resultados dos testes de análise térmica de algumas amostras de briquetes produzidos.

A comparação entre os briquetes produzidos experimentalmente e o briquete comercial Tramontina demonstra que as formulações desenvolvidas apresentam desempenho térmico competitivo e, em alguns aspectos, superior ao produto comercial. O briquete do Teste 11 destacou-se pela maior temperatura de início da degradação (303,50 °C) e pela menor perda de massa total (61,55%), indicando maior estabilidade térmica e maior formação de resíduo carbonáceo. Essas características são desejáveis em aplicações que requerem combustão prolongada e maior resistência ao armazenamento e transporte.

Por sua vez, os briquetes dos Testes 3 e 4 apresentaram maiores valores de entalpia total e exotérmica que o briquete Tramontina, evidenciando maior potencial de liberação energética durante a combustão. O Teste 3 mostrou-se particularmente interessante por combinar estabilidade térmica semelhante à do produto comercial com maior energia liberada durante os eventos oxidativos.

De maneira geral, os resultados indicam que os briquetes produzidos nos Testes 3 e 11 apresentam desempenho igual ou superior ao briquete comercial Tramontina, sendo o Teste 11 mais indicado para aplicações que demandam estabilidade térmica e o Teste 3 mais promissor quando o objetivo é maximizar a energia liberada durante a combustão.

Tabela 1 – Comparação termogravimétrica entre os briquetes produzidos (Testes 3, 4 e 11) e o briquete da Tramontina e a lenha de eucalipto

	Briquete Tramontina	Teste 4	Teste 11	Teste 3	Lenha de Eucalipto
ΔH Total	5.748,98 ± 114,74 J/g	7.592,54 ± 134,58 J/g	6.603,66 ± 170,64 J/g	7.430,61 ± 150,13 J/g	6.957,68 ± 145,29 J/g
ΔH Exotérmico	2.416,09 ± 532,08 J/g	3.804,98 ± 319,45 J/g	2.220,70 ± 141,40 J/g	3.511,54 ± 328,20 J/g	3.130,14 ± 112,44 J/g
Ti Exotérmico	292,25 ± 14,91 °C	276,30 ± 4,65 °C	303,50 ± 2,92 °C	293,89 ± 5,64 °C	267,81 ± 3,90 °C
Tf Exotérmico	503,45 ± 1,55 °C	480,64 ± 2,79 °C	481,11 ± 0,67 °C	485,59 ± 2,29 °C	460,40 ± 1,50 °C
Perda % de Massa	72,62 ± 5,31 %	75,88 ± 2,96 %	61,55 ± 0,74 %	69,27 ± 2,47 %	74,72 ± 1,69 %

Embora a umidade do briquete seja influenciada pelo conteúdo de umidade da biomassa de origem no momento de fabricação, por se tratar de um material higroscópico, o produto densificado também pode ter sua umidade alterada quando não for armazenado em embalagens que vedem a absorção de umidade.

As Figuras seguintes (4 a 6) apresentam os resultados de infravermelho das amostras estudadas, em termos da absorbância (%) versus comprimento de onda (cm^{-1}), antes e após a queima, com os respectivos resultados em cinza (antes da queima) e preto (após a queima).

Figure 4- FTIR do briquete Tramontina (A) e lenha de eucalipto (B)

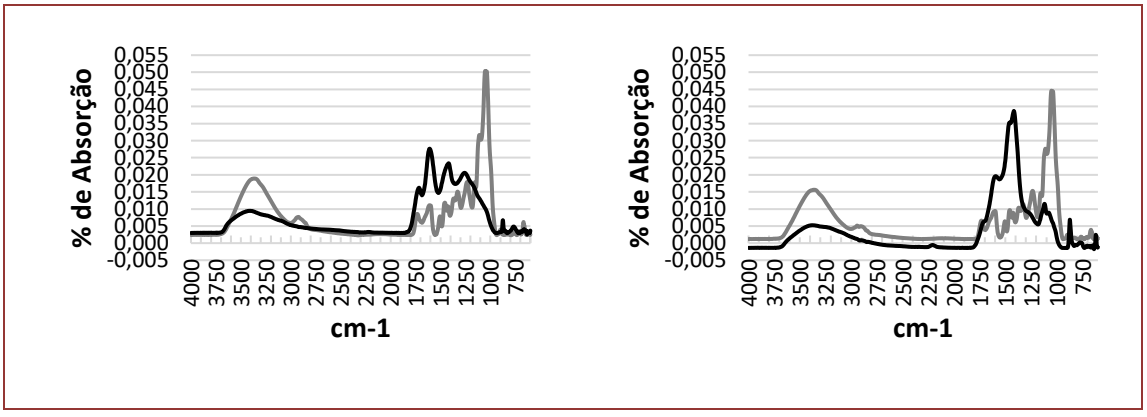


Figure 5- FTIR do briquete Teste 4 (A) e Teste 11 (B)

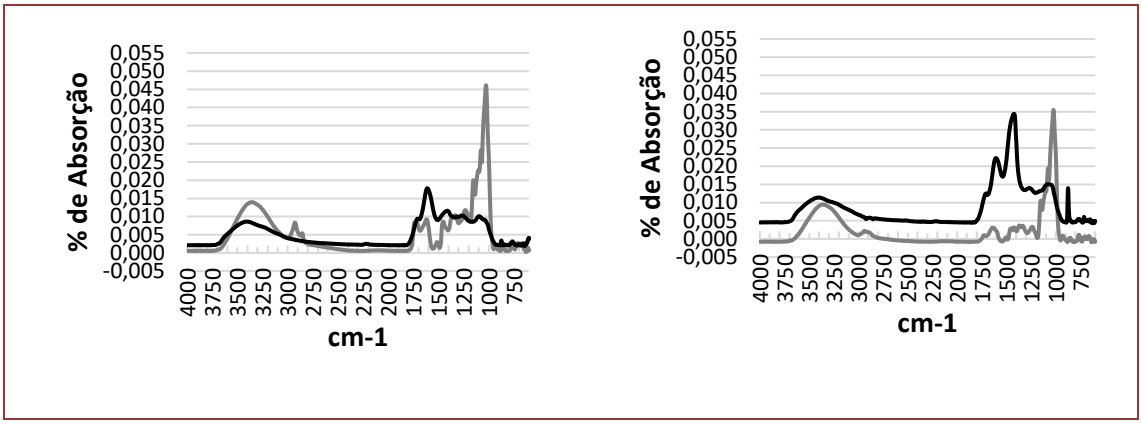
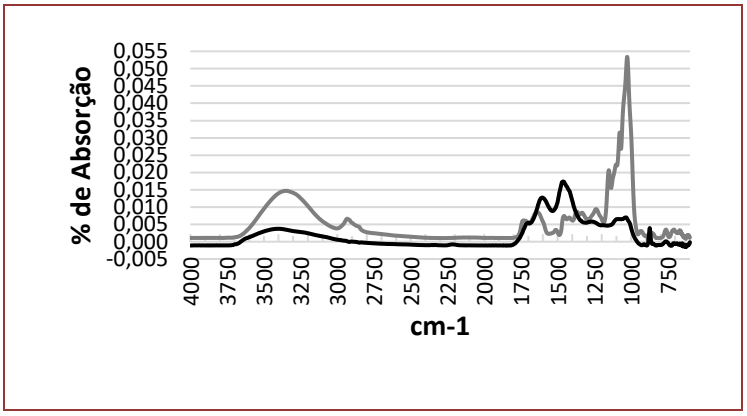


Figure 6 - FTIR do briquete Teste 3



Os espectros FTIR dos briquetes e da lenha de eucalipto apresentam elevada similaridade, demonstrando que todos os combustíveis possuem composição predominantemente lignocelulósica. As bandas observadas entre 3347 e 3369 cm^{-1} são atribuídas à ligação O-H de grupos hidroxila presentes na celulose, hemicelulose e lignina. As bandas entre 2856 e 2943 cm^{-1} correspondem à ligação C-H de grupos alifáticos, característicos das cadeias orgânicas da biomassa.

As bandas próximas de 1730 cm^{-1} , observadas em todas as amostras, são associadas à ligação C=O de grupos carbonila presentes principalmente na hemicelulose. Já as bandas entre 1500 e 1619 cm^{-1} são atribuídas às vibrações aromáticas da lignina, indicando a presença da fração lenhosa típica de resíduos de madeira.

As bandas mais intensas em torno de 1020–1160 cm^{-1}, particularmente nos briquetes Tramontina, Teste 3 e Teste 4, estão associadas às ligações C-O e C-O-C da celulose e hemicelulose. Em todas as amostras é evidente, antes da queima, a máxima intensidade de absorbância em torno de 1023-1052 cm^{-1}.

Esses resultados indicam que os briquetes dos Testes 3 e 4 apresentam composição química muito próxima à do briquete comercial Tramontina e da lenha de eucalipto. O Teste 11, embora apresente os mesmos grupos funcionais, possui menor intensidade espectral geral.

Após a combustão, todas as amostras apresentaram redução do número de picos de treze para sete, evidenciando a degradação térmica dos constituintes lignocelulósicos e a formação de resíduos carbonizados.

As bandas associadas à celulose e hemicelulose diminuíram substancialmente, principalmente na região de 1000–1300 cm^{-1}. Da mesma forma, as bandas de grupos carbonila, próximas de 1730 cm^{-1} , foram reduzidas, indicando decomposição da hemicelulose durante a combustão.

Os resultados de FTIR demonstram que os briquetes dos Testes 3, 4 e 11 possuem composição química típica de biomassa lignocelulósica, semelhante à observada no briquete comercial Tramontina e na lenha de eucalipto. Entre os briquetes avaliados, o Teste 3 apresentou a maior similaridade espectral com o briquete Tramontina, tanto antes quanto após a combustão. O Teste 4 apresentou comportamento muito próximo ao Teste 3, enquanto o Teste 11 mostrou menor intensidade inicial das bandas e maior formação de estruturas aromáticas residuais após a queima. Dessa forma, considerando exclusivamente os resultados de FTIR, os briquetes dos Testes 3 e 4 foram os que mais se aproximaram do desempenho químico do briquete comercial Tramontina e da lenha de eucalipto, indicando elevado potencial para aplicação energética.

4. CONCLUSÕES

A técnica de briquetagem por batelada hermética desenvolvida neste trabalho demonstrou viabilidade técnica para a produção de briquetes lignocelulósicos utilizando resíduos de madeira associados ou não a resíduos alimentícios como aglutinantes. O sistema proposto permitiu a obtenção de briquetes com boa estabilidade dimensional, adequada resistência mecânica e densidades compatíveis com os requisitos normalmente adotados para biocombustíveis sólidos densificados.

Os resultados das análises térmicas mostraram que os briquetes produzidos apresentaram comportamento competitivo em relação ao briquete comercial Tramontina e à lenha de eucalipto. O briquete do Teste 11 destacou-se pela maior estabilidade térmica, evidenciada pela maior temperatura de início da degradação e pela menor perda de massa durante o aquecimento, características que favorecem o armazenamento, transporte e combustão mais prolongada. Por outro lado, o briquete do Teste 3 apresentou elevado potencial energético, com valores de entalpia total e exotérmica superiores aos observados para o produto comercial, indicando maior capacidade de liberação de energia durante a combustão.

As análises por FTIR confirmaram que os briquetes produzidos possuem composição química típica de materiais lignocelulósicos, apresentando grupos funcionais característicos de celulose, hemicelulose e lignina. Os briquetes dos Testes 3 e 4 apresentaram os espectros mais semelhantes aos do briquete comercial Tramontina e da lenha de eucalipto, evidenciando comportamento químico compatível com combustíveis sólidos amplamente utilizados.

De modo geral, os resultados obtidos demonstram que a briquetagem por batelada hermética representa uma alternativa promissora para o aproveitamento energético de resíduos lignocelulósicos e alimentícios, contribuindo para a valorização de resíduos, redução de impactos ambientais e diversificação das fontes renováveis de energia. Recomenda-se, para trabalhos futuros, a realização de ensaios complementares de resistência mecânica, durabilidade, poder calorífico superior e emissões atmosféricas,

visando ampliar a avaliação do desempenho dos briquetes produzidos em aplicações industriais e domésticas.

REFERÊNCIAS

[1] ARAÚJO, V. C. et al. Estudo do aproveitamento de podas de árvores para produção de briquetes em dois municípios do Rio Grande do Sul. In: **CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO IFRN**, 9., 2013. Anais [...]. Natal: IFRN, 2013. p. 673-679.

[2] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C702/C702M-11: Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2011.

[3] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E870-06: Standard Test Methods for Analysis of Wood Fuels**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2006.

[4] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E871-13: Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2013.

[5] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E872-13: Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2013.

[6] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E1534-93(2017): Standard Test Method for Determination of Ash Content of Particulate Wood Fuels**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.

[7] BIOMASSA – COMÉRCIO DE RAÇÕES, ENERGIA E ADUBOS LTDA. Thierry Constant Eddy François Marie Gauthier; Paulo Rosário Carvalho de Oliveira Costa; Luiz Antonio Stamatis de Arruda Sampaio. **Processo industrial, com baixo consumo de energia, de transformação de biomassa, com umidade relativa superior a 25% para produção de grânulos combustíveis**. Patente BR PI0700893-7 A, 2 jan. 2008.

[8] BIOMASSA – COMÉRCIO DE RAÇÕES, ENERGIA E ADUBOS LTDA. Thierry Constant Eddy François Marie Gauthier; Paulo Rosário Carvalho de Oliveira Costa; Luiz Antonio Stamatis de Arruda Sampaio. **Processo industrial, com baixo consumo de energia, de transformação de biomassa, com umidade relativa igual ou inferior a 25% para produção de pellets combustíveis**. Patente BR PI0700892-9 A, 2 jan. 2008.

[9] DIAS, J. M. C. S. et al. **Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais**. Brasília, DF: EMBRAPA Agroenergia, 2012. 132 p. (Documentos, 13).

[10] EMBRAPA AGROENERGIA. **Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais**. Brasília, DF: EMBRAPA, 2012.

[11] EMERHI, E. A. Physical and combustion properties of briquettes produced from sawdust of three hardwood species and different organic binders. *African Journal of Agricultural Research*, v. 6, n. 2, p. 236-246, 2011.

[12] GONÇALVES, J. E. et al. Energia de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de *Eucalyptus grandis*. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 13, n. 5, p. 657-661, 2009.

[13] HENRIQUES, R. M. **Aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos: uma abordagem tecnológica**. 2004. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

[14] KEMMER, E. M.; PONTALTI, J. R. **Método para reutilização de resíduos industriais sólidos provenientes de madeira para uso como energia**. Patente BR PI0302261-7 A, 22 mar. 2005.

[15] KLAUMANN, G. S. A. **Composto à base de resíduos de madeira**. Patente BR PI0804015-0 A2, 22 jun. 2010.

[16] KRIZAN, P. et al. Optimal conditions for valorization of wood waste by briquetting. In: **INTERNATIONAL DAAAM BALTIC CONFERENCE**, 8., 2012, Tallinn. Proceedings [...]. Tallinn: DAAAM International, 2012.

[17] MATÚŠ, M. et al. Effects of initial moisture content on physical and mechanical properties of Norway spruce briquettes. *International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering*, v. 9, n. 10, p. 1227-1233, 2015.

[18] QUIRINO, W. F. et al. Poder calorífico da madeira e de materiais lignocelulósicos. *Revista da Madeira*, n. 89, p. 100-106, 2005.

[19] SANT'ANNA, M. C. S. et al. Caracterização de briquetes obtidos com resíduos da agroindústria. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, v. 14, n. 3, p. 289-294, 2012.

[20] SANTOS, M. L. et al. Estudo das condições de estocagem do bagaço de cana-de-açúcar por análise térmica. *Química Nova*, v. 34, n. 3, p. 507-511, 2011.

[21] SILVA, D. A. et al. Caracterização de biomassa para briquetes. *Floresta*, v. 45, n. 4, p. 713-722, 2015.

[22] SILVA, F. B. A. **Desenvolvimento de uma técnica para produção de briquetes verdes com alta granulometria de resíduos de biomassa**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2014.

[23] SILVERSTEIN, R. M.; WEBSTER, F. X.; KIEMLE, D. J. **Identificação espectrométrica de compostos orgânicos**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

[24] UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. Silva, F. B. A.; Tardin, P. L. J.; Câmara, L. D. T. **Produção de briquetes de sobras de madeira (e/ou lignocelulósicos) de alta granulometria utilizando resíduos alimentícios como aglutinantes**. Patente BR PI102014025318-1, 2014.

[25] UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE. Morais, F. R. et al. **Composto a partir de biomassa e glicerina**. Patente BR PI0905574-6 A2, 16 ago. 2011.

[26] ELECTRICITÉ DE FRANCE. Tabet, F. et al. **Briquete baseado em um corpo comprimido lignocelulósico impregnado com combustível líquido**. Patente BR PI102012005108-7 A2, 4 fev. 2014.

[27] SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL (SENAI-SP). Bertolo, L. R. et al. **Processo de produção de briquetes**. Patente BR PI1104560-4 A2, 13 ago. 2013.

[28] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM SI10: Standard for Use of the International System of Units (SI): The Modern Metric System**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2010.

Capítulo 5

Desidratação de abóbora (Cucurbita spp.) por diferentes métodos de secagem: uma síntese comparativa tecnológica para a produção de snacks

Durval Guedes dos Santos Neto
Denisdelkian Souza Diniz
Jônatas Gabriel Santos Raiff de Araujo
Joselma Araújo de Amorim
Geraldo Dantas Silvestre
Pierre Corrêa Martins
Everton Pereira Fernandes
Agahilton Oliveira de Souza Júnior
Antônio Diógenes Texeira de Azevedo
Anoar Abbas El-Aouar
Josevan da Silva

Resumo: A abóbora (*Cucurbita spp*.) é uma hortaliça de elevada importância nutricional e econômica, cuja composição é rica em carotenoides, vitamina C e compostos fenólicos, tornando-a uma matéria-prima promissora para o desenvolvimento de produtos desidratados de alto valor agregado. Os métodos de secagem devem ser avaliados, pois exercem efeitos distintos sobre os atributos de qualidade do produto final. O presente trabalho consiste em uma revisão atualizada da literatura sobre as tecnologias de desidratação aplicadas à fatias de abóbora e seus efeitos na qualidade comercial do produto e potenciais de aplicação para produção de snacks. A pesquisa caracteriza-se como uma revisão bibliográfica de natureza aplicada, com abordagem quali-quantitativa, fundamentada na análise de 19 artigos científicos selecionados a partir de bases de dados acadêmica e científica com recorte temporal de 2015 a 2025. Os resultados revelaram que a secagem convectiva por ar quente, embora predominante em 63,2% dos estudos por seu baixo custo operacional, quando realizada a temperaturas superiores a 65 °C produz snaks com os maiores índices de encolhimento, maior dureza mecânica e maiores perdas de vitamina C e carotenoides. A liofilização demonstrou a maior preservação estrutural e nutricional, com retenção de carotenoides superior a 80% e dureza próxima a 129,7 N, sendo, contudo, economicamente inviável para aplicações em larga escala. A secagem por micro-ondas a vácuo (MVD) emergiu como a alternativa mais equilibrada entre qualidade e viabilidade técnica, com retenção de carotenoides de aproximadamente 89,1%, tempos de operação inferiores a 60 minutos e geração do efeito de puffing, o qual é favorável à crocância do produto. O branqueamento e a desidratação osmótica, quando empregados como pré-tratamentos, mostraram-se estratégicos para a inativação enzimática, redução da umidade inicial do material e estabilização da cor, com baixo custo de implantação. A análise comparativa evidenciou que não existe um método universalmente superior, mas um espectro de tecnologias cujo desempenho deve ser avaliado em função do perfil de qualidade almejado, da escala de produção e das restrições econômicas de cada contexto de aplicação.

Palavras-chave: abóbora; secagem; snacks; carotenoides; qualidade tecnológica.

1. INTRODUÇÃO

Integrantes do gênero Cucurbita, as abóboras, morangas ou jerimuns como são popularmente conhecidas, fazem parte das hortaliças mais comercializadas mundialmente. No Brasil, a cultura ocupa o sétimo lugar dentre as hortaliças mais produzidas e a maior parte de sua produção se concentra nas regiões Nordeste e Sudeste (RAMBO; LAFORGA; SANTI, 2019, AMARO *et al.*, 2021). Atualmente a abóbora está em uma posição de destaque na comunidade científica nutricional devido aos recentes estudos sobre a sua composição e potencial bioativo no organismo humano. A alta concentração de carotenóides, proteínas, ácidos graxos, vitaminas e de minerais, ajudam a reduzir o risco de doenças severas tais como: hipertensão, diabetes, Alzheimer, doença de Parkinson e câncer (NASRI *et al.*, 2014; DOTTO; CHACHA, 2020). No entanto, após descascada, a abóbora se torna bastante vulnerável à deterioração desses componentes por causa da ação microbiana e perda de água. Portanto, métodos e técnicas de secagem são utilizadas para aumentar o seu tempo de vida útil (ALTAF *et al.*, 2025).

A desidratação atua reduzindo o teor de umidade e atividade de água presente no meio, desfavorecendo o crescimento microbiano e reações enzimáticas indesejáveis que causam a deterioração do alimento. Proporcionando assim, um maior tempo de prateleira ao produto e conservando uma considerável proporção de seus nutrientes. Também representa uma estratégia de agregação de valor comercial à abóbora, transformando um vegetal que possui baixo valor de mercado in natura em um produto processado com maior potencial de consumo (ANDRADE, 2023). Diversos métodos de secagem podem ser empregados para a desidratação da abóbora, desde os métodos convencionais aos mais modernos. A escolha da tecnologia aplicada é uma etapa fundamental no processamento de alimentos, pois suas diferentes técnicas exercem efeitos distintos sobre os atributos de qualidade do produto. A literatura apresenta estudos que descrevem separadamente os efeitos de cada método e sua técnica de secagem com a abóbora, porém carece de uma síntese atualizada que reúna e compare de forma organizada os efeitos dos diferentes métodos de secagem sobre os atributos de qualidade tecnológica de fatias de abóbora.

O presente trabalho propõe uma revisão da literatura científica atual sobre as diferentes tecnologias de secagem aplicadas à desidratação de fatias de abóbora (Cucurbita spp.), contribuindo para consolidar o conhecimento disponível, identificar lacunas e oferecer subsídios técnicos para a pesquisa e indústria de alimentos. Seu objetivo geral é elaborar uma síntese comparativa dos métodos e técnicas de secagem para fatias de abóbora (*Cucurbita spp.*), analisando seus efeitos sobre a qualidade do produto, para apresentar seu desempenho de uso na produção de um *snack* vegetal.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. CARACTERIZAÇÃO BOTÂNICA E IMPORTÂNCIA DA ABOBÓRA

2.1.1. TAXONOMIA E ESPÉCIES

A abóbora pertence à família Cucurbitaceae, que engloba importantes hortaliças cultivadas mundialmente, como o melão (Cucumis melo), o pepino (Cucumis sativus) e a melancia (Citrullus lanatus). As principais espécies de abóboras cultivadas são: C. moschata, C. maxima, C. Pepo, C. ficifolia e C. Argyrosperma, cada uma apresentando ampla variabilidade genética, com diferenças em características morfológicas, composição química, e adaptabilidade climática (AMARO *et al.*,2021). No Brasil, as

espécies predominantes são C. Moschata e C.maxima, amplamente cultivadas em diferentes regiões devido a sua rusticidade e aceitação dentro do mercado.

2.1.2. DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA E PRODUÇÃO

O Brasil figura entre os maiores produtores mundiais de abóbora, com destaque para as regiões Nordeste e Sudeste do país. A cultura demonstra elevada adaptabilidade a diferentes condições climáticas, sendo cultivada tanto em regiões de clima tropical úmido quanto em regiões semiáridas. A adaptação climática da abóbora lhe confere grande relevância no abastecimento do mercado interno, consolidando-a como uma das hortaliças de maior importância econômica (AMARO *et al.*, 2021).

2.1.3. ASPECTOS SOCIOECONÔMICOS

A abóbora representa uma importante fonte de renda para pequenos agricultores por apresentar baixo custo de implantação e manutenção de cultivo e é amplamente produzida em regime de agricultura familiar (AMARO *et al.*, 2021). A sua alta disponibilidade no mercado contribui para a estabilização dos preços, tornando-a acessível à população e, paralelamente, abrindo perspectivas para desenvolvimento de novos produtos com maior valor agregado, como farinhas, extratos, purês e outros.

2.2. COMPOSIÇÃO QUÍMICA E AÇÃO FUNCIONAL DA ABOBÓRA

2.2.1. COMPOSIÇÃO CENTESIMAL

A polpa de abóbora é constituída majoritariamente por carboidratos, fibras dietéticas (especialmente pectinas e hemiceluloses) e de um baixo teor de lipídeos. Embora o conteúdo proteico seja considerado moderado quando comparado com a semente, a literatura reporta a presença de aminoácidos essenciais com relevância biológica. A estabilidade desses constituintes durante o processamento térmico é um fator crítico, uma vez que a ocorrência da Reação de Maillard pode comprometer não apenas o valor nutricional do produto, mas também seus atributos de cor, resultando no escurecimento indesejável do produto final. A Tabela 1 apresenta as informações da composição centesimal através das informações de NEPA (2011) e USDA (2015).

Tabela 1: Composição centesimal da polpa de abóbora baseada na literatura.

Componentes	Composição mássica percentual (%)
Umidade	91,2[i]
Cinzas	8,9[i]
Lipídeos	1,2[i]
Proteína	11,2[i]
Carboidratos	73,1[i]
Fibra Alimentar	5,6[i]
Cálcio	250,0[ii]
Zinco	3,8[ii]
Ferro	9,5[ii]

[i]Composição mássica em: (gramas)/(100 gramas);
[ii]Composição mássica em: (gramas)/(100 miligramas).

Fonte: Adaptado de NEPA (2011) e USDA (2015).

2.2.2. CAROTENÓIDES E COMPOSTOS ANTIOXIDANTES

A abóbora se destaca entre as hortaliças pela sua alta concentração de carotenóides, os quais são pigmentos lipossolúveis responsáveis pela cor alaranjada característica das espécies *C. moschata* e *C. maxima*. O β-caroteno é o carotenóide de maior relevância tecnológica e nutricional, sendo precursor da vitamina A no organismo humano e utilizado como indicador de qualidade em produtos com abóbora desidratada. É uma molécula altamente insaturada, apresentando sensibilidade acentuada à luz, ao oxigênio e às elevadas temperaturas, fatores que comprometem a sua estabilidade durante o processamento térmico (LIMA *et al.*, 2019).

Além dos carotenóides, a abóbora é rica em ácido ascórbico (vitamina C) e compostos fenólicos que atuam sinergicamente no incremento da capacidade antioxidante do alimento. Esses compostos exercem papel protetor contra o estresse oxidativo no organismo, além de favorecerem a estabilidade e a qualidade sensorial do produto final. A retenção desses compostos durante a desidratação é fortemente influenciada pelo método de secagem adotado, temperatura aplicada e o tempo de exposição ao calor, sendo em um critério de avaliação da qualidade comercial de fatias desidratadas de abóbora (KULCZYŃSKI; SIDOR; GRAMZA-MICHAŁOWSKA, 2020).

2.3. FUNDAMENTOS DA SECAGEM DE ALIMENTOS

A secagem é definida como um processo simultâneo de transferência de calor e massa, em que a energia térmica fornecida ao alimento causa a evaporação da água presente em sua estrutura acordo com o mecanismo de método utilizado. A transferência de calor dá-se do meio externo para o meio interno no alimento, enquanto a transferência de massa ocorre no sentido inverso, com a migração da água do meio interno para a sua superfície e, posteriormente, para o ar (ARSLAN; ALIBAŞ, 2024). A eficiência desse processo depende de variáveis operacionais da corrente de ar, tais como, temperatura, umidade relativa, velocidade de escoamento, e das características físicas do produto, representadas por geometria, espessura, porosidade e composição química (IBRAHIM *et al.*, 2023).

O teor de umidade e a atividade de água (Aw) são parâmetros fundamentais no controle da qualidade de produtos desidratados. O teor de umidade expressa a quantidade total de água presente no alimento, podendo ser expresso em base úmida ou base seca, enquanto a atividade de água representa a disponibilidade desta água sujeita a reações químicas, enzimáticas e microbiológicas (QIU *et al.*, 2019). Produtos com Aw inferior a 0,60 são considerados microbiologicamente estáveis, inibindo o crescimento da maioria dos microrganismos deteriorantes e patogênicos. No caso de fatias desidratadas de abóbora, a redução simultânea do teor de umidade e da Aw é determinante para a obtenção de um produto seguro, crocante e com maior vida de prateleira (SKÅRA *et al.*, 2023).

2.4. MÉTODOS DE SECAGEM

A secagem por convecção de ar quente, ou secagem convectiva, é o processo mais utilizado na secagem de hortaliças em escala industrial e laboratorial (AN *et al.*, 2024). O processo envolve o uso de circulação forçada do ar quente sobre a superfície do alimento, o que leva a inferência de transferência de calor para o alimento removendo a água sob a forma de vapor. A temperatura do ar, velocidade de circulação do ar e a umidade relativa do ar são fatores determinantes operacionais desse método, cujas técnicas de escomento de ar

e contato sólido-fluido influenciam diretamente na taxa de secagem e na qualidade comercial do produto (TÉLLEZ-PÉREZ *et al.*, 2019)

A secagem solar é um processo convencional de baixos custos operacionais, que é muito comum em regiões de clima tropical e semiárido, como no Nordeste brasileiro. A secagem solar é um processo em que se utiliza o sol como fonte de calor para promover a evaporação da água presente no alimento. O processo pode ser direto, quando se utiliza a exposição direta do produto à radiação solar, ou indireto, quando se utilizam os chamados secadores solares (AKTER *et al.*, 2024).

A liofilização, também denominada de freeze-drying, é considerada como um dos processos mais eficazes em termos de preservação de compostos bioativos em alimentos. O processo consiste na sublimação da água previamente congelada no produto, ou seja, a água passa diretamente do estado sólido para o gasoso sem passar pelo estado líquido, em condições de baixa pressão e temperatura. Essa operação elimina a necessidade de aquecer diretamente o alimento, minimizando danos térmicos à sua estrutura celular e a desnaturação dos compostos orgânicos. A principal limitação desse método é seu elevado custo operacional (equipamentos) e energético, demandando longos tempos de processamento, o que restringe sua aplicação, principalmente, à escala laboratorial e a produtos de alto valor agregado (BHATTA; STEVANOVIC JANEZIC; RATTI, 2020).

A secagem por micro-ondas baseia-se na conversão de energia eletromagnética em calor, que é produzido diretamente no interior do alimento pela movimentação das moléculas de água em resposta às ondas eletromagnéticas. Ao contrário da secagem convectiva, a qual transfere calor da superfície para o interior do produto, a secagem por micro-ondas aquece o produto de forma volumétrica. Isso gera gradientes de temperatura e pressão interna que aceleram consideravelmente a migração da água para a superfície, facilitando sua evaporação (AN *et al.*, 2024). Esse funcionamento implica ao uso de radiação em tempos de secagem substancialmente menores em comparação aos métodos convencionais, com potencial de redução do consumo energético total do processo. Todavia, é um método que requer um controle preciso da potência, visto que potências elevadas podem causar superaquecimento localizado no alimento, comprometendo a cor, textura e a retenção de compostos termossensíveis (PANIGRAHI *et al.*, 2025).

O método de secagem a vácuo por sua vez, atua sob pressão reduzida, diminuindo o ponto de ebulição da água e permitindo que a sua evaporação venha a ocorrer a temperaturas significativamente mais baixas do que em temperaturas padrões de secagem convectiva (KARABACAK *et al.*, 2025). O processo é indicado para a produção de produtos secos com menor encolhimento, melhor retenção de compostos bioativos e cor mais próxima à do produto fresco, quando comparado à secagem convectiva (ORREGO; SALGADO; SARMIENTO, 2023). As principais limitações referem-se ao custo do equipamento e à menor capacidade de processamento em escala industrial, tornando-o mais comum em aplicações de pequeno porte.

A desidratação é um método que consiste na imersão do alimento em uma solução hipertônica, geralmente se faz uso de soluções aquosas de sacarose e/ou de cloreto de sódio, que provoca a saída de água do produto por diferença de pressão osmótica sem utilização de calor, preservando a maioria de compostos que não suportam elevadas temperaturas (RAMACHANDRAN *et al.*, 2024). Contudo, a desidratação osmótica raramente é utilizada como único e principal método de secagem, sendo mais frequentemente empregada como pré-tratamento antes da secagem convectiva ou outros métodos, com o propósito de reduzir o teor de umidade inicial do produto, o tempo total

de processo e o seu consumo de energia (NOWACKA *et al.*, 2024).). Além de remover parte da água, a desidratação osmótica faz com que os solutos sejam incorporados na estrutura do produto, o que pode ajudar a manter a cor e a preservar os compostos bioativos até o fim da secagem.

Os métodos híbridos referem-se em geral a métodos combinados de dois ou mais métodos de secagem, buscando assim, aproveitar as vantagens individuais de cada um, minimizando suas limitações. A Panigrahi *et al.* (2025) citam métodos combinados de secagem convectiva com micro-ondas, secagem osmótica seguida de secagem convectiva e a combinação de infravermelho com convecção de ar quente.

2.5. TÉCNICAS DE SECAGEM

A qualidade do produto final resultante da desidratação depende não só do método de secagem utilizado, mas como esses processos foram realizados conforme suas variações de condições de desenho operacional e de tratamento da matéria-prima. Os pré-tratamentos da matéria-prima têm como objetivo principal preparar o material para a secagem, evitando alterações não desejadas na cor, textura e perda de componentes essenciais, além de diminuir o tempo necessário para o processo e o uso de energia. A escolha do pré-tratamento mais adequado depende do método de secagem, das características do produto e dos atributos de qualidade priorizados.

O processo de preparação inicial das fatias de abóbora envolve etapas como a escolha das unidades, sua higienização, descascamento, remoção das sementes e corte em fatias com espessura uniforme. A espessura das fatias é um fator importante no processo de secagem, pois influencia diretamente na área de superfície disponível para contato com o agente de secagem, assim como, a distância que a água precisa percorrer desde o interior até a superfície do produto. Fatias mais finas tendem a secar mais rapidamente e requerem um tempo de processamento menor, mas estão mais propensas ao encolhimento excessivo e à fratura durante a manipulação. A espessura das fatias na faixa de 3 a 10 mm são as mais comuns nos estudos sobre secagem de fatias de abóbora e a padronização dessa espessura é fundamental para assegurar a uniformidade dos resultados e a reprodução do processo (MKHIZE *et al.*, 2023).

O branqueamento é um tratamento preparatório muito comum feito antes de secar hortaliças. Seu procedimento é deixar as hortaliças expostas a água quente ou sob vapor por um tempo específico e depois resfriar rapidamente com água fria. O objetivo principal do branqueamento é desativar enzimas oxidativas, especialmente a peroxidase e a polifenoloxidase, que causam o escurecimento enzimático e a degradação de pigmentos e compostos bioativos durante e depois do processamento (PIEPIORKA-STEPUK *et al.*, 2023). Além de desnaturar as enzimas, o branqueamento favorece a mobilidade das células, auxiliando o seu deslocamento e a movimentação do escoamento de umidade do material para o meio durante o processo de secagem, e também diminui a quantidade de microrganismos presentes na superfície do produto. Para fatias de abóbora, o branqueamento é feito em temperaturas entre 80°C e 100°C, por 1 a 5 minutos. É muito importante controlar bem essas condições para não perder sua reserva de vitamina C e outros componentes que são sensíveis ao calor (ADILETTA *et al.*, 2018).

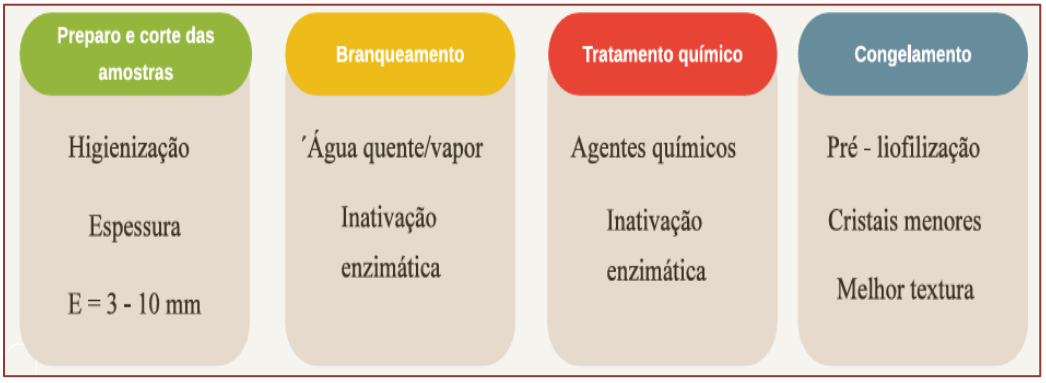
Os tratamentos químicos são usados para evitar ou adiar as reações de escurecimento sofridas pelas fatias de abóbora durante o processo de secagem. Entre os agentes mais comuns, estão o ácido cítrico, o ácido ascórbico e o metabissulfito de sódio. O ácido cítrico

é responsável por reduzir o pH da superfície do produto, o qual impede que as enzimas oxidativas atuem. Já o ácido ascórbico atua como um agente redutor, competindo com o substrato que as enzimas polifenoloxidase precisam para realizarem suas reações, evitando assim a formação de manchas escuras (MURATORE *et al.*, 2015).

O congelamento antes de tudo é um tratamento preparatório importante e essencial para a liofilização, pois o processo de sublimação precisa que a água do produto esteja já no estado sólido antes de começar. As fatias de abóbora são congeladas rapidamente, normalmente a temperaturas entre -18°C e -80°C, antes de serem colocadas na câmara de liofilização (FELLOWS, 2019). A velocidade como o gelo se forma afeta o tamanho dos cristais que se formam dentro das células. Quando o congelamento é rápido, os cristais são menores e mais parecidos entre si, o que causa menos dano às células e ajuda a preservar melhor a textura e a estrutura porosa do produto depois que o gelo é transformado em vapor. Além da liofilização, o congelamento prévio do material pode ser usado como um tratamento inicial em outros métodos de secagem. O objetivo é quebrar a estrutura das células do produto, auxiliando assim, a transferência de massa mais rápida e reduzindo o tempo de secagem. Porém, esse tipo de técnicca não é muito aplicado a secagem de fatias de abóbora (ANDO; OKUNISHI; OKADOME, 2019).

A Figura 1 reune as informações das principais técnicas de secagem e seus atributos.

Figura 1: Principais técnicas de secagem e seus atributos de uso.



Fonte: MKHIZE *et al.* (2023), ADILETTA *et al.* (2018), MURATORE *et al.* (2015), FELLOWS (2019), ANDO; OKUNISHI; OKADOME (2019).

2.6. QUALIDADE COMERCIAL DE VEGETAIS DESIDRATADOS

No objetivo de avaliar a qualidade de alimentos desidratados, faz-se indispensável a verificação de atributos sensoriais e físico-químicos como a textura, cor, teor de umidade e atividade de água do produto processado, assim como a análise de atributos associados à composição nutricional. Essa integração significa não apenas assegurar a estabilidade e aceitação sensorial, mas também a preservação de vitaminas, minerais e compostos bioativos e o valor nutritivo ao longo do processo de redução de umidade.

O teor de umidade e a atividade de água (Aw) são parâmetros fundamentais para a estabilidade microbiológica e qualidade de produtos desidratados, assim como, a sua estabilidade química e as suas características sensoriais. Para fatias desidratadas de abóbora do tipo snack, a literatura indica como referência teores de umidade inferiores a 10% em base úmida, valores que garantem a inibição do crescimento microbiano e textura

crocante ao produto. Estudos demonstram que os valores de Aw obtidos após secagem adequada situam-se abaixo de 0,60, cuja faixa de valores é considerada segura para inibir a maioria dos microrganismos deteriorantes e patogênicos, enquanto valores abaixo de 0,30 asseguram também a inibição de reações enzimáticas e oxidativas (Köprüalan *et al.*, 2021).

A cor de alimentos desidratados é um dos atributos sensoriais que mais possui influência na aceitação do produto pelo consumidor, sendo avaliada instrumentalmente por meio do sistema CIELab, que descreve a cor em três dimensões: L (luminosidade, variando de 0-preto a 100-branco), a* (balanço verde-vermelho, valores negativos indicam verde e positivos indicam vermelho) e b* (balanço azul-amarelo, valores negativos indicam azul e positivos indicam amarelo). Em fatias de abóbora desidratadas, a coloração alaranjada intensa é o padrão desejável, a qual está associada à elevada concentração de carotenóides preservados durante os processos. De acordo com Henriques *et al.* (2011), a abóbora fresca apresenta coloração característica com valores de a* negativos (predomínio de tom esverdeado) e b* positivos (coloração amarela característica da polpa). Köprüalan *et al.* (2021) relatam que os vegetais, a abóbora por exemplo, apresentam um comportamento padrão similar durante a sua secagem para a variação de cor. De acordo o método aplicado, a luminosidade (L*) aumenta progressivamente com a redução de umidade, enquanto a* e b* tendem a se aproximar da coloração branca, retornando parcialmente às características do material fresco ao final do processo.

O encolhimento é um fenômeno inerente ao processo de desidratação, resultante da perda de água e da tensão estrutural gerada durante o processo. Em fatias de abóbora, percentuais de encolhimento superiores a 50% são frequentemente reportados em métodos convectivos operados a altas temperaturas, comprometendo a aparência visual e a uniformidade do produto final (MAHIUDDIN *et al.*, 2018).

A textura é considerada o fator mais crucial para vegetais desidratados e *snacks* vegetais, sendo a crocância o seu parâmetro principal de qualidade. A textura de produtos desidratados está diretamente relacionada à sua estrutura interna, especialmente à porosidade e à resistência mecânica à fratura. A análise de perfil de textura (TPA) é o método instrumental mais utilizado para quantificar parâmetros como dureza, crocância e firmeza. Essas características estão fortemente relacionadas a valores mais baixos de força de ruptura e maior porosidade. Além disso, a densidade aparente também é entendida como um indicador indireto da textura, sendo inversamente proporcional à crocância (SIDDIQUI *et al.*, 2023).

A retenção de carotenóides e vitamina C é considerada um dos indicadores mais sensíveis da eficiência tecnológica do processo de secagem, dado o elevado valor nutricional desses compostos na abóbora e sua reconhecida termossensibilidade. A literatura estabelece que retenções superiores a 70% de carotenóides totais após a secagem são indicativas de um processo tecnologicamente adequado para a preservação do valor nutricional da hortaliça. Para a vitamina C, por sua maior sensibilidade térmica e oxidativa, retenções acima de 50% já são consideradas satisfatórias em processos que envolvem aplicação de calor. Esses parâmetros funcionam como critérios comparativos entre métodos, sendo amplamente utilizados na literatura para avaliar o impacto do binômio tempo-temperatura sobre a qualidade nutricional de fatias desidratadas de abóbora (OUYANG *et al.*, 2022).

3. METODOLOGIA

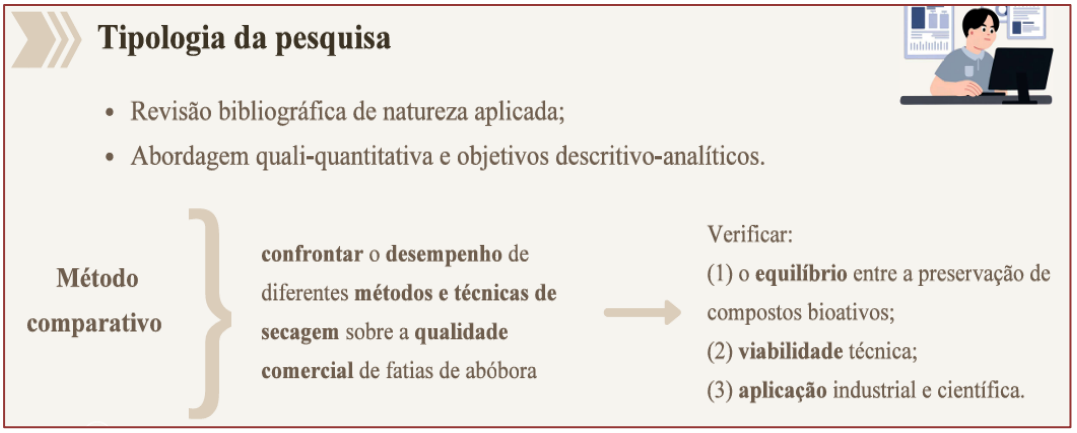
3.1. DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa baseou-se em artigos científicos, teses, dissertações, livros técnicos e trabalhos apresentados em eventos científicos, com foco em tecnologia de alimentos. O recorte temporal compreendeu o período de 2015 a 2025, garantindo a atualidade e relevância das informações levantadas. As consultas foram realizadas de forma sistemática nas bases de dados *Science Direct*, *Scopus*, *Food Science and Technology Abstracts* (FSTA) e no Portal de Periódicos CAPES. O levantamento concentrou-se em temas pertinentes aos métodos de secagem aplicados a fatias de abóbora (*Cucurbita spp.*), com ênfase nos efeitos do processamento sobre a qualidade do produto seco, analisando especificamente os parâmetros físico-químicos, a retenção de compostos bioativos e atributos de textura como dureza e crocância do material.

3.2. TIPOLOGIA DA PESQUISA

A presente pesquisa caracteriza-se como uma revisão bibliográfica de natureza aplicada, com abordagem quali-quantitativa e objetivos descritivo-analíticos. Utiliza o método comparativo para confrontar, a partir de dados secundários de estudos experimentais, o desempenho de diferentes métodos e técnicas de secagem sobre a qualidade comercial de fatias de abóbora. Essa estrutura permite verificar o equilíbrio entre a preservação de compostos bioativos e viabilidade técnica, transpondo o conhecimento teórico para perspectivas reais de aplicação industrial e científica. A Figura 2 apresenta o resumo das informações sobre a tipologia da pesquisa.

Figura 2: Resumo da tipologia da pesquisa.



Fonte: Autor (2026).

3.3. COLETA DE DADOS

A estratégia de busca fundamentou-se no cruzamento de descritores técnicos em português e inglês, por meio dos operadores booleanos AND e OR. Foram utilizados termos como “fatias de abóbora” (pumpkin slices), “secagem” (drying), “atividade de água” (water activity), “textura” (texture) e “carotenóides” (carotenoids). O processo inicial de seleção baseou-se na triagem de títulos e resumos, priorizando trabalhos que apresentassem dados quantitativos sobre atividade de água, teor de umidade, textura e estabilidade de compostos bioativos.

3.4. CRITÉRIOS DE EXCLUSÃO

Foram estabelecidos os seguintes critérios de exclusão dos artigos: (i) Artigos que foram publicados fora do intervalo temporal determinado (2015-2025); (ii) Estudos que não tenham adotado a abóbora (Cucurbita spp.) como principal material de análise; (iii) Trabalhos que não tenham descrito adequadamente o método e a técnica de secagem utilizada; (iv) Ausência de dados quantitativos sobre, no mínimo, um dos seguintes atributos de qualidade comercial de interesse do produto, tais como: teor de umidade, atividade de água, cor, textura, encolhimento e compostos bioativos; (v) Artigos tenham sido escritos em idiomas diferentes de português, inglês e espanhol; (vi) Os resumos de eventos científicos que não tenham apresentado dados experimentais completos; (vii) Revisões bibliográficas e sistemáticas que tenham sido usadas somente como fonte secundária para rastreamento de referências primárias.

3.5. ANÁLISE DE DADOS

Os documentos selecionados foram submetidos à leitura integral, para extração e organização das informações em uma matriz de síntese comparativa. Em seguida, os documentos foram analisados sob a ótica da engenharia de processos, confrontando-se os diferentes métodos e técnicas de secagem em relação à sua eficiência na preservação dos atributos de qualidade tecnológica. A discussão buscou estabelecer correlações críticas entre as condições de tempo e temperatura aplicadas e os seus impactos diretos na retenção de carotenóides e vitamina C, desenvolvimento de textura e, em especial, nos aspectos de dureza e crocância das fatias desidratadas.

A busca nas bases de dados resultou em um total de 45 artigos identificados. Após a triagem por título e resumo, 12 registros foram eliminados por não atenderem aos critérios de elegibilidade estabelecidos, de forma que 33 trabalhos foram submetidos à leitura na íntegra. Destes, 19 artigos compuseram a base final para a construção da revisão, sendo 14 excluídos após leitura completa por não apresentarem dados suficientes sobre os parâmetros de interesse da pesquisa.

A Figura 3 apresenta o fluxograma da abordagem da literatura de pesquisa aplicada.

Figura 3: Fluxograma de análise e escolha da literatura específica de pesquisa.

Fonte: Autor (2026).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados compilados a partir da análise dos 19 artigos selecionados permitiram sistematizar o panorama atual das tecnologias de desidratação aplicadas à abóbora. A discussão a seguir está estruturada de forma a comparar o desempenho técnico dos diferentes métodos de secagem, correlacionando as variáveis de processamento com os indicadores de qualidade e as perspectivas de suas aplicações para a produção de *snacks*.

4.1. CATEGORIZAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DE SECAGEM

Para fins de análise comparativa, as tecnologias identificadas na literatura foram subdivididas em três grupos principais de acordo com o mecanismo de transferência de energia e nas condições operacionais de secagem.

O primeiro grupo compreende os métodos fundamentais de transferência convectiva na forma de calor com uso de ar quente e secagem solar, que representam as técnicas mais difundidas industrialmente devido ao seu menor custo operacional.

O segundo grupo abrange as tecnologias que operam em condições de vácuo ou baixas temperaturas, com destaque para liofilização, visando a máxima preservação de compostos termossensíveis.

O terceiro grupo é composto por processos combinados de transferência de calor e massa de dois (02) ou mais métodos e técnicas de secagem, tais como, micro-ondas associado ao vácuo, infravermelho a vácuo, micro-ondas convectivo e qualquer outra combinação que utilize no mínimo dois métodos de desidratação.

Adicionalmente, foi avaliado o papel do branqueamento, congelamento e tratamentos químicos como etapas preparatórias de secagem. Estes pré-tratamentos atuam de forma complementar à secagem, influenciando diretamente a cinética de remoção de água e a manutenção das características sensoriais e nutricionais das fatias de abóbora.

A desidratção osmótica não foi aplicada como método de secagem isolado e também não considerado como método híbrido em composição com os demais nos estudos selecionados. Esse método de secagem foi denominado como pré-tratamento para redução de umidade de fatias de abóbora, portanto nesse trabalho as informações sobre a desidratção osmótica de abóbora estaram vinculadas os tópicos de técnicas de secagem, representada como uma etapa de pré-tratamento da matéria-prima.

4.2. TIPOS DE MÉTODOS E TÉCNICAS DE SECAGEM DE ABÓBORA

4.2.1. APLICAÇÃO E FREQUÊNCIA DOS TIPOS MÉTODOS DE SECAGEM

A análise das 19 fontes de pesquisa distintas revelou uma diversidade tecnológica considerável, com uma tendência acentuada à comparação de métodos convencionais frente a tecnologias emergentes. A secagem convectiva por ar quente permanece como a tecnologia de referência, sendo empregada em 63,2% dos estudos (12 das 19 fontes). Esta predominância deve-se ao seu papel como "método de controle", servindo de referência para a validação de novos protocolos de desidratação.

As tecnologias que utilizam a radiação eletromagnética também ganharam destaque, com o micro-ondas (em suas variações de vácuo, intermitente ou híbrido) presente em 36,8% das pesquisas. Notavelmente, a secagem solar e o infravermelho, presentes em 21,1% e 15,8% dos trabalhos utilizados,respectivamente, surgem como alternativas viáveis para a otimização energética do processo.

Embora a liofilização, citada em 15,8% do material de estudo, seja reconhecida pela excelência na manutenção da estrutura celular e dos bioativos, sua frequência moderada reflete as limitações de custo para a produção em larga escala de *snacks* de abóbora. Por fim, tecnologias de métodos combinados, tais como, o Puffing e a Bomba de Calor, verificadas em 15,8% do material de pesquisa, demonstram a fronteira da inovação na busca por texturas diferenciadas para o mercado de vegetais desidratados.

A distribuição dessas metodologias, segmentadas por sua recorrência nas fontes selecionadas, está detalhada na Tabela 2, que apresenta a frequência das tecnologias de secagem aplicadas à matriz de abóbora.

Tabela 2: Frequência das tecnologias de secagem aplicadas à abóbora (Cucurbita spp.) identificadas na literatura de pesquisa utilizada.

Método de secagem (Técnicas de secagem)	Frequência (Nº de Estudos)	Frequênia Percentual (%)[i]
Secagem convectiva com ar quente (Tipos de escoamento de ar)	12	63,2%
Micro-ondas (Vácuo, intermitente ou Híbrido)	7	36,8%
Secagem solar (Túnel, PCM ou natural)	4	21,1%
Secagem por infravermelho *(IR)*	3	15,8%
Liofilização *(Freeze-Drying - FD)*	3	15,8%
Outras tecnologias *(Puffing*, Bomba de calor, *Multi-flash)*	3	15,8%

[i]Percentual calculado com base no total de 19 fontes únicas. A soma das frequências excede o número de fontes, visto que diversos estudos realizam análises simultâneas comparativas.

Fonte: Autor (2026).

4.2.2. TÉCNICAS DE SECAGEM: CONDIÇÕES OPERACIONAIS E PRÉ-TRATAMENTOS

A análise das condições experimentais nas 19 fontes obtidas apontou que apesar da heterogeneidade dos métodos e protocolos de desidratação utilizados, todos os parâmetros foram ajustados buscando o balanço entre a eficiência da remoção de água e a preservação da integridade dos compostos termossensíveis presentes na abóbora, estabelecendo assim, a qualidade tecnológica como critério central de otimização em todos os estudos analisados. Os parâmetros operacionais de suas faixas de valores adequados para os métodos de secagem apresentandos na Tabela 2 para se obter a maios qualidade comercial do produto seco de fatias de abóbora estão apresentados a seguir.

4.2.2.1. TEMPERATURA DE SECAGEM

No método de secagem convectiva se observou uma faixa operacional de temperatura predominante entre 50 ºC e 70ºC, sendo a temperatura de 60ºC o valor mais adequado e indicado. Autores como Chikpah *et al.* (2022) e Ando, Okunishi e Okadome (2019) reportaram esta condição como ideal para maximizar a difusividade de umidade sem comprometer rigorosamente a coloração e o teor de carotenoides, evitando o escurecimento não enzimático (Reação de Maillard) e a degradação térmica excessiva devido a temperaturas superiores.

4.2.2.2. GEOMETRIA E ESPESSURA DAS FATIAS

Verificou-se a predominância do uso da matéria-prima em fatias finas (discos ou planos retos) com espessura variando entre 3 mm e 7 mm. A escolha dessa faixa foi realizada com o propósito de reduzir a resistência interna à transferência de massa, permitindo uma secagem mais uniforme, mitigando o fenômeno de case hardening (endurecimento superficial), que ocorre quando a taxa de evaporação superficial excede a migração interna de umidade, criando uma barreira que dificulta a desidratação (SERCAN *et al.*, 2022).

4.2.2.3. TEMPO DE PROCESSAMENTO

Observou-se uma ampla variação entre as tecnologias encontradas nas pesquisas. Enquanto a secagem solar em túnel ou por convecção natural exigiu tempos mais prolongados, entre 5,5 e 9 horas (330 a 540 min), respectivamente, os métodos de micro-ondas a vácuo (MVD) e o infravermelho, apresentaram tempos de processo significativamente menores. Song *et al.* (2016) e Joudi-Sarighayeh *et al.* (2022) reportaram processos finalizados em tempos inferiores a 60 minutos sob condições otimizadas de potência os métodos combinados de micro-ondas a vácuo e o método de infravermelho. Em contrapartida, a liofilização demandou maiores intervalos operacionais, frequentemente entre 24 e 48 horas (SEREMET *et al.*, 2016).

4.2.2.4. VARIÁVEIS DO PRÉ-TRATAMENTO DA MATÉRIA-PRIMA

O branqueamento é o tratamento prévio mais utilizado em secagem de vegetais. O branqueamento foi utilizado nos estudos selecionados para inativação enzimática (peroxidase e polifenoloxidase) e a preservação da cor, com tempos de imersão oscilando entre 40 segundos em água fervente (100 ºC) e 1 a 3 minutos em temperatura de 60 a 70 ºC (OUYANG *et al.*, 2022).

4.3. EFEITOS OPERACIONAIS NA QUALIDADE COMERCIAL DO PRODUTO

A seguir serão discutidas as informações coletadas sobre a influência dos tipos de métodos/técnicas de secagem (mecanismos de remoção de umidade) e condições operacionais (temperatura, geometria do material, pré-tratamentos do material) sobre a qualidade comercial do produto desejável (*snacks* de abóbora).

4.3.1. EFEITOS DO PROCESSAMENTO SOBRE A UMIDADE E ATIVIDADE DE ÁGUA DOS *SNACKS*

A redução do teor de umidade e atividade de água (Aw) é o objetivo primário dos processos de desidratação, sendo os principais indicadores da estabilidade microbiológica e da vida de prateleira de *snacks* de abóbora. A análise dos trabalhos selecionados revelou que para obtenção de uma textura crocante e segura, a umidade final do produto deve se situar entre 3% e 8% em base úmida e com valores de Aw inferiores a 0,6 (SEREMET, 2016; MONTEIRO, 2018; KÖPRÜALAN, 2021).

Observou-se que métodos assistidos, como o Micro-ondas a Vácuo (MVD) e a Secagem por Infravermelho (IR), promovem uma redução abrupta da umidade nos estágios iniciais. Conforme discutido por Song *et al.* (2016), a geração interna de calor no MVD cria um gradiente de pressão de vapor que retira a umidade do centro para a periferia da fatia, superando a resistência interna da matriz celular de forma mais eficiente que a convecção pura.

Chikpah *et al.* (2020) demonstraram na secagem convectiva de fatias de abóbora em camada delgada (finas fatias de matéria-prima) a 60 °C é possível se atingir uma atividade de água (Aw) inferior a 0,6 (valor crítico para inibição do crescimento de fungos e leveduras, redução de reações de oxidação lipídica e degradação de vitaminas).O equilíbrio higroscópico das amostras é alcançado de forma a garantir que o produto final

permaneça fora da zona de perigo microbiano, mantendo a estabilidade físico-química durante o armazenamento.

Quando se usou desidratação osmótica como pré-tratamento seguida de secagem convectiva ou por micro-ondas, foi possível obter Aw entre 0,30 e 0,50 com controle muito melhor do encolhimento (SALEENA; JAYASHREE; ANEES., 2021).

A remoção intensiva de água eleva a temperatura de transição vítrea do alimento, assim, quando a umidade atinge valores reduzidos, os açúcares e polímeros da abóbora passam do estado "borrachudo" para o estado "vítreo", resultando na crocância característica dos chips (SONG *et al.*, 2016).

Verificou-se que em relação a espessura das partículas, as fatias mais finas (3 mm a 5 mm) atingem o nível de Aw de segurança, valor crítico de inibição microbiana, em menor tempo operacional em relação ao sólido com maiores espessuras. Isso é devido à redução do percurso difusivo de remoção de água do matriz sólida, mitigando a formação de gradientes de umidade que poderiam causar a degradação interna do produto (LECH *et al.*, 2018). A Tabela 3 destaca os principais efeitos dos métodos de secagem para a umidade final e atividade de água do produto seco.

Tabela 3: Parâmetros de umidade (% em base seca) e atividade de água (Aw) de abóbora desidratada por diferentes métodos de secagem registrados na literatura.

Métodos de secagem	Umidade final (% base seca)	Atividade de água (Aw)[i]
Secagem convectiva com ar quente	5,0 – 7,4%	0,3 – 0,6
Liofilização (*Freeze-Drying)*	1,7 a 5,0%	0,4 – 0,5
Micro-ondas/convecção	7,4%	0,3 – 0,4
Micro-ondas/vácuo	2,1 – 5,0%	0,3 – 0,4
Infravermelho/vácuo	6,0%	0,2
Túnel Solar/Bombas de calor	6,0 – 8,0%	0,2 – 0,3

Fonte: Autor (2026).

5.3.2. EFEITOS DO PROCESSAMENTO SOBRE A COR DOS *SNACKS* DE ABÓBORA

A coloração da abóbora, que transita entre o amarelo vibrante e o laranja intenso, é o reflexo direto de sua matriz fitoquímica, composta majoritariamente por α e β-caroteno e luteína. Os resultados compilados demonstram que a estabilidade cromática dos *snacks* é governada por um binômio entre a integridade química desses pigmentos e as alterações físicas na microestrutura do tecido vegetal durante a secagem. A análise comparativa dos métodos de secagem para alteração da cor do matéria-prima e coloração final do produto seca está descrita nos seguintes itens:

- Liofilização (FD): Consolidou-se como o método de preservação superior, apresentando os maiores valores de luminosidade (L*). A análise indica que a estrutura altamente porosa resultante da sublimação do gelo altera a reflexão da luz na superfície do produto, podendo causar um leve "branqueamento" visual, mas mantendo a fidelidade tonal do vegetal fresco (ANDO; OKUNISHI; OKADOME, 2019).
- Micro-ondas a vácuo (MVD): Apresentou uma performance superior à secagem convectiva, com retenção de carotenóides totais próxima a 89%. A exaustão do

oxigênio sob vácuo, combinada à rápida taxa de aquecimento, mitiga a oxidação pigmentar e reduz drasticamente o tempo de exposição térmica (GHABOOS *et al.*, 2016).

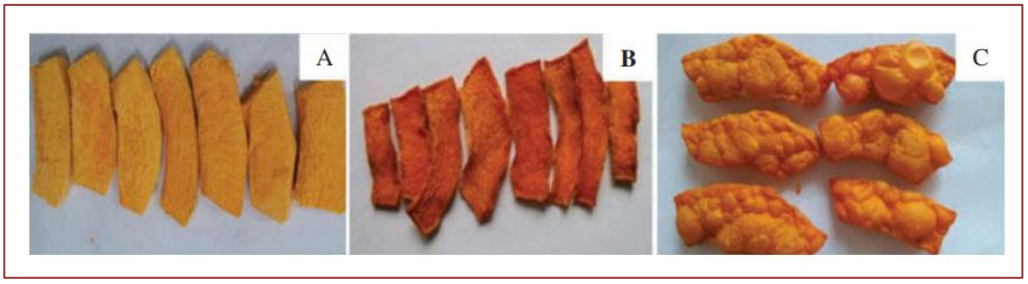
- Secagem convectiva: Frequentemente resultou em produtos com menor L* e elevada variação total de cor (ΔE). Contudo, Chikpah *et al.* (2022) observaram um fenômeno cinético relevante: embora temperaturas elevadas acelerem a degradação, o tempo total de processo reduzido pode resultar em um (ΔE) final menor do que em exposições prolongadas a temperaturas mais baixas (cerca de 50 °C).
- Secagem solar e infravermelho (IR): A modalidade solar direta apresentou riscos de fotodegradação e desbotamento por radiação UV. Já no infravermelho, os dados indicam que potências elevadas elevam o (ΔE) devido ao aquecimento intenso da superfície, que pode desencadear o escurecimento antes da secagem completa do núcleo (GHABOOS *et al.*, 2016).

Os resultados permitem identificar fatores importantes que alteram diretamente a cinética de cor nas fatias de abóbora. Abordando a parte de exposição de calor e oxigênio, que induz a isomerização (trans para cis) e oxidação. O trabalho de Ouyang *et al.* (2021) fornece um dado crítico em que esteres de carotenóides na abóbora mostram-se mais termorresistentes do que os pigmentos livres, o que auxilia na manutenção da cor em processos otimizados. Por outro lado, pigmentos epóxidos como a violaxantina demonstrou ser altamente termolábil.

Em processos acima de 70 ºC ou de tempo prolongado, a reação de Maillard manifesta-se de forma predominante, onde a interação entre açúcares redutores e aminoácidos resulta na síntese de melanoidinas de tonalidade castanha (JUNQUEIRA; CORRÊA; ERNESTO, 2017).

A Figura 6 demonstra o efeito dos diferentes métodos de secagem sobre a coloração e formato dos *snaks* de abóboras.

Figura 6: *Snacks* de abóbora desidratados por liofilização (A), secagem convectiva (B) e Micro-ondas e vácuo (C).



Fonte: Song *et al.* (2016).

4.2.5. EFEITOS DO PROCESSAMENTO SOBRE A TEXTURA E MICROESTRUTURA

A textura dos *snacks* de abóbora é um dos atributos de qualidade mais sensíveis às condições de contorno do processo, sendo o resultado direto das tensões geradas na matriz sólida durante a transferência simultânea de massa e calor. Os dados revisados

indicam que a perda de turgor celular e o colapso das paredes das células são os mecanismos determinantes para as alterações de firmeza, volume e aceitabilidade sensorial.

Os resultados de trabalhos envolvendo secagem convectiva (HAD) frequentemente apontam para fatias com elevada dureza e matriz compacta. Esse comportamento é atribuído ao fenômeno de case hardening (endurecimento superficial), no qual a rápida evaporação na interface produto-ar cria uma camada rígida. Esta camada atua como uma barreira física que dificulta a migração da umidade interna, resultando em um produto final com alta resistência mecânica e baixa porosidade. A liofilização (FD) por sua vez, consolidou-se como o método que produz os *snacks* com a menor dureza registrada (ex: 129,7 N em comparação aos 1346 N observados na HAD). Ao preservar a estrutura celular quase intacta via sublimação do gelo, o processo FD gera uma matriz macia e quebradiça, com porosidade análoga à do fruto fresco (MONTEIRO *et al.*, 2018).

O uso de Micro-ondas a Vácuo (MVD) e a secagem por expansão explosiva (Explosive Puffing Drying-EPD) promovem o efeito de puffing. Nesses métodos, a rápida geração interna de vapor cria uma pressão que expande os espaços intercelulares antes do colapso estrutural. O resultado, conforme discutido por Köprüalan *et al.* (2021), são *snacks* com estrutura porosa e crocância otimizada, caracterizada por múltiplos picos de fratura em testes de compressão.

A secagem solar e a convectiva pura apresentam os maiores índices de contração devido ao longo tempo de exposição térmica e ao colapso gradual do parênquima (GHABOOS *et al.*, 2016). Em contrapartida, métodos assistidos por infravermelho (IR) ou vibração (VIR) tendem a minimizar a redução de volume ao acelerar a cinética de secagem, "congelando" a estrutura antes que o colapso total ocorra.

A capacidade de reabsorção hídrica está intrinsecamente ligada a essa integridade. Amostras que sofreram colapso severo (HAD) exibem baixa razão de reidratação, enquanto aquelas com estrutura expandida (FD e MVD) reidratam-se rapidamente devido à sucção capilar facilitada pelos espaços intercelulares preservados.

Segundo Ando, Okunishi e Okadome (2019), o aquecimento durante o branqueamento induz a reação de beta-eliminação nas pectinas da parede celular. Esse processo promove a quebra das cadeias de homogalacturonanas e a perda de adesão entre as células, resultando em uma textura significativamente mais macia e reduções de até 94% na tensão de fratura antes da secagem.

O congelamento prévio rompe fisicamente as membranas celulares via formação de cristais de gelo, o que aumenta a difusividade de umidade e resulta em *snacks* menos compactos. Já a desidratação osmótica (DO) atua como um agente de reforço estrutural; a impregnação de solutos na matriz celular ajuda a manter a integridade volumétrica, mitigando o colapso durante a fase térmica de secagem (ANDO; OKUNISHI; OKADOME, 2019).

O uso de desidratação osmótica como pré-tratamento (principalmente associada a ultrassom) ajudou a preservar a crocância após a secagem final, reduzindo a perda excessiva de sólidos solúveis e minimizando o encolhimento (SALEENA; JAYASHREE; ANEES, 2021).

4.2.6. EFEITOS DO PROCESSAMENTO SOBRE COMPOSTOS BIOATIVOS

A liofilização (FD) e a secagem por micro-ondas a vácuo (MVD) consolidaram-se como as tecnologias de maior retenção de carotenoides totais. A FD, ao operar por sublimação em baixas temperaturas e pressão reduzida, elimina a exposição direta ao calor, atingindo teores de até 776 µg/g no produto seco (ZHANG *et al.*, 2017; SEREMET *et al.*, 2016). A MVD, por sua vez, combina aquecimento volumétrico rápido com a exaustão de oxigênio proporcionada pelo vácuo, retendo aproximadamente 89,1% dos carotenoides totais em tempos de processo significativamente menores (SONG *et al.*, 2017). Em contraste, a secagem convectiva por ar quente (HAD) resulta em perdas mais severas, determinadas pela exposição prolongada ao calor e ao oxigênio atmosférico, com retenções frequentemente inferiores a 60% em temperaturas acima de 70 °C (CHIKPAH *et al.*, 2022).

Do ponto de vista molecular, o processamento térmico induz duas vias principais de degradação do β-caroteno: a isomerização geométrica, com conversão dos isômeros all-trans para formas cis (9-cis, 13-cis e 15-cis) e a oxidação da molécula, com formação de 5,6-epóxido-β-caroteno sob condições de calor excessivo e presença de oxigênio. Ambas as vias são minimizadas em processos conduzidos sob vácuo ou baixas temperaturas.

Para os compostos fenólicos totais (TPC), a relação com a temperatura de secagem apresenta comportamento bifásico: temperaturas moderadas, entre 60 °C e 70 °C, podem exercer efeito protetor indireto ao inativar rapidamente a polifenoloxidase (PPO), enzima responsável pela degradação oxidativa dos fenóis. Nessa faixa, a inativação enzimática supera o dano térmico direto. Contudo, em métodos híbridos ou convectivos operados acima de 70 °C, o dano térmico aos fenóis torna-se predominante, resultando em uma perda severa de TPC.

Sobre o teor de vitamina C, as perdas reportadas variaram de 21,5% a 41,1% na secagem convectiva, com retenção máxima observada em temperaturas entre 50 °C e 65 °C. Um aspecto citado por Joudi-Sarighayeh *et al.*, (2022) é de que fatias de maior espessura podem oferecer proteção relativa ao núcleo do produto contra a oxidação imediata, uma vez que a camada superficial atua como barreira temporária à difusão de oxigênio para o interior da fatia durante as fases iniciais do processo. Na liofilização e na secagem a vácuo, as retenções de vitamina C chegam a 75%, confirmando a superioridade desses métodos também para esse composto (KÖPRÜALAN *et al.*, 2021).

Tabela 4: Valores percentuais de carotenoides retidos em abóbora desidratada por diferentes métodos de secagem.

Métodos de secagem	Carotenoides retidos (%)
Secagem convectiva com ar quente	40,0%
Liofilização (*Freeze-Drying)*	92,0%
Micro-ondas/vácuo	89,1%
Infravermelho/vácuo	71,0%
Túnel solar/Bombas de calor	74,6%

Fonte: Autor (2026).

4.2.7. EFEITOS DOS PRÉ-TRATAMENTOS NOS *SNACKS*

Quanto ao papel dos pré-tratamentos, o branqueamento, embora essencial para a inativação de peroxidase e polifenoloxidase, requer controle rigoroso do binômio tempo-

temperatura para minimizar perdas por degradação dos compostos hidrossolúveis, em especial a vitamina C. Por outro lado, a desidratação osmótica com soluções à base de sucos de frutas concentrados representa uma estratégia inovadora de enriquecimento funcional: Lech *et al.* (2018) demonstraram que a impregnação osmótica com sucos de arônia e framboesa permitiu elevar o conteúdo de fenóis totais do produto em até 10 vezes, incorporando antocianinas e outros polifenóis exógenos à matriz da fatia de abóbora, com impacto expressivo na capacidade antioxidante final do snack.

A literatura revisada evidencia um aumento no uso de métodos combinados e pré-tratamentos, com o objetivo de aumentar a eficiência de secagem eliminando falhas individuais da particularidade de cada tecnologia, empregando combinações de limitações de consegue atender simultaneamente a todos os requisitos de um snack de abóbora de alta qualidade. A secagem convectiva convencional (HAD) peca pela baixa eficiência energética e pela degradação térmica acentuada. A liofilização (FD), embora excelente na preservação estrutural, tem custos operacionais proibitivos para produção em escala. É nesse impasse que os métodos híbridos emergem como a alternativa mais promissora, pois combinam mecanismos físicos distintos para explorar sinergias reais.

4.3. DESEMPENHO DOS MÉTODOS DE SECAGEM

De acordo com as pesquisas realizadas, se entende que a seleção do método de secagem para a abóbora (Cucurbita spp.) em escala industrial é condicionada por dois vetores interdependentes:

1) A maximização do rendimento, compreendida como a capacidade de obtenção de um produto seco com menor perda estrutural e nutricional,
2) A eficiência operacional, expressa pela redução do tempo de processamento e do consumo energético associado.

A análise comparativa das fontes revela que, enquanto os métodos convencionais priorizam o baixo custo de capital (CAPEX), as tecnologias híbridas e avançadas visam mitigar o colapso estrutural e a degradação termolábil.

A secagem convectiva por ar quente representa o número de maior difusão industrial e consitui referencial comparativo para a a avaliação das demais tecnologias de secagem. Sua consolidação decorre do baixo custo de capital (CAPEX) e simplicidade operacional. Entretanto, como discutido em seções anteriores, para a desidratação de uma matriz alimentar como a abóbora, o emprego de temperaturas mais baixas favorece a retenção de carotenóides e demais compostos termolábeis, podendo, contudo, resultar em um produto com menor dureza, rigidez e um tempo de processamento consideravalmente prolongado

A liofilização por sua vez, representa o extremo oposto em termos de preservação: ao operar sob pressão reduzida e temperaturas baixas, minimiza a degradação térmica e preserva a integridade estrutural do produto. Contudo, os custos operacionais associados à manutenção do vácuo e ao longo tempo de processo tornam sua aplicação economicamente inviável para a maior parte das operações industriais de escala convencional, com uso restrito a aplicações de elevado valor agregado ou a estudos de caráter experimental.

O emprego dos métodos baseados em radiação eletromagnética, como o infravermelho e por micro-ondas, também é recorrente na literatura. O efeito de puffing gerado pelas

micro-ondas melhora a porosidade e crocância do produto, conferindo-lhe um perfil textural diferenciado, porém, o custo médio-alto associado à complexidade do controle de potência e temperatura desfavorece a aplicação isolada desse método para a secagem de abóbora. A secagem por infravermelho, por sua vez, em razão do mecanismo de radiação em comprimentos de ondas mais longo, proporciona taxas de transferências de calor superiores às da convecção e da micro-ondas, com redução de tempo de até 50%. Contudo, impõe limitações quanto à espessura das fatias de abóbora e ao risco de escurecimento localizado por reação de Maillard em potências elevadas.

O Quadro 1 sintetiza, de forma comparativa, as principais vantagens e desvantagens dos métodos de secagem abordados, permitindo uma visão consolidada do desempenho de cada tecnologia para a produção de *snacks* de abóbora.

Quadro 1: Comparativo das vantagens e desvantagens dos métodos de secagem para a produção de *snacks* de abóbora (Cucurbita spp.)

Método	Vantagens	Desvantagens
Secagem convectiva por ar quente	- Baixo custo de capital (CAPEX); - Simplicidade operacional; - Ampla difusão industrial.	- Baixa retenção de compostos bioativos; - Tempo prolongado; - Produto sujeito a escurecimento não enzimático (reação de Maillard).
Secagem por micro-ondas	- Efeito de *puffing* melhora porosidade e crocância; - Menor tempo de secagem em relação à convecção.	- Custo de médio a alto; - Complexidade de controle de potência e temperatura; - Baixa retenção de compostos bioativos.
Secagem por Infravermelho	- Menor tempo de secagem em relação a micro-ondas e convectiva; - Maiores taxas de transferência de calor	- Limitações quanto à expessura das fatias; - Risco de escurecimento localizado por reação de Maillard em potências elevadas.
Liofilização	- Mínima degradação térmica; - Elevada preservação estrutural e nutricional do produto.	- Custo operacional muito elevado; - Longo tempo de processo; - Inviabilidade em escala convencional.
Métodos combinados: Micro-ondas vácuo, Convecção-vácuo	- Maior retenção de compostos termolábeis; - Menor tempo de processamento; - Melhor qualidade de textura.	- Custo de implementação consideravelmente elevado.
Secagem solar assistida por bomba de calor	- Baixo custo operacional; -Bom desempenho em regiões de alta incidência solar; -Desempenho próximo ao de outros métodos mais sofisticados.	- Dificuldade de controle de umidade final; - Risco de fotodegradação; - Dependência de condições climáticas locais.
Pré-tratamentos combinados: Branqueamento e Tratamento osmótico	- Redução do escurecimento enzimático; - Diminuição da umidade inicial; - Menor tempo de processamento; - Baixo investimento.	- Exige um controle adequado para não comprometer atributos sensoriais.

Fonte: Autores (2026).

Diante do balanço entre custos operacionais e eficiência do processo, os métodos combinados emergem como alternativas tecnológicas capazes de contribuir para o desenvolvimento de melhores produtos desidratados de maior qualidade com sustentabilidade energética.

A associação do vácuo aos demais métodos convencionais, contribui significativamente para retenção de compostos termolábeis, agregando maior valor ao produto seco; entretanto eleva consideravelmente o custo de implementação.

O uso de pré-tratamentos combinados às etapas de secagem também se mostra relevantes, uma vez que o branqueamento contribui para a diminuição da atividade enzimática e o tratamento osmótico para a diminuição da umidade inicial da matéria prima, resultando em menor tempo de processamento sem incremento significativo nos custos de implementação.

A secagem solar, embora tecnicamente simples e de baixo custo operacional merece menção devido a sua relevância regional, especialmente para o Nordeste brasileiro. Apesar das dificuldades inerentes ao controle da umidade final do produto e ao risco de fotodegradação de carotenóides, sua hibridização com sistemas de bomba de calor assistida por energia solar (SAHPD) pode melhorar expressivamente seu desempenho, se aproximando qualitativamente de métodos tecnologicamente mais sofisticados.

5. CONCLUSÃO

Essa pesquisa identificou seis categorias principais de tecnologias de secagem aplicadas à matriz de abóbora: secagem convectiva por ar quente, secagem solar, liofilização, micro-ondas, infravermelho e métodos combinados. A secagem convectiva por ar quente destacou-se como a tecnologia de maior difusão nos estudos analisados, presente em 63,2% das fontes, cumprindo papel de referencial comparativo para as demais tecnologias.

A comparação dos efeitos dos métodos sobre os parâmetros de qualidade comercial revelou um gradiente de desempenho tecnológico bem definido. A liofilização e a secagem por micro-ondas a vácuo (MVD) apresentaram os melhores resultados para preservação de compostos bioativos, com retenções de carotenoides superiores a 80% e 89%, respectivamente, além de produzirem estruturas porosas de menor dureza. A secagem convectiva por ar quente, embora de menor custo de implementação, resultou nos maiores índices de encolhimento, maior dureza mecânica e nas mais severas perdas de vitamina C e carotenoides, particularmente quando operada acima de 70 °C. A secagem por infravermelho demonstrou capacidade intermediária, com taxas de transferência de calor superiores à convecção isolada e tempos de processo reduzidos, porém com risco de escurecimento do produto em potências elevadas.

Verificou-se que a combinação de pré-tratamentos com os métodos de secagem exerce papel estratégico na otimização do processo. O branqueamento é eficaz na inativação enzimática e na estabilização da cor, com impacto direto na redução do escurecimento não enzimático durante a secagem. A desidratação osmótica empregada como pré-tratamento contribuiu para a redução da umidade inicial do material e para a preservação da integridade estrutural das fatias ao longo da fase térmica, mitigando o colapso celular e reduzindo o tempo total de processamento. A adoção de espessuras entre 3 mm e 7 mm se mostrou determinante para a uniformidade da secagem e para a mitigação do fenômeno de case hardening.

Esse estudo demonstrou que existe um espectro de tecnologia de uso, cuja adequação depende do perfil de qualidade almejado, da escala de produção e das restrições econômicas do processo. A MVD e os métodos combinados com vácuo emergem como as alternativas mais equilibradas entre qualidade e viabilidade técnica para a produção de *snacks* de abóbora, ao aproximar a qualidade comercial do produto a obtida com o uso da liofilização com custos operacionais intermediários.

A secagem convectiva moderada, associada a pré-tratamentos de baixo custo como o branqueamento, permanece como opção tecnicamente acessível para escalas menores, desde que operada em condições controladas de temperatura.

REFERÊNCIAS

[1] ADILETTA, G. *et al.* Dehydration and rehydration characteristics of pretreated pumpkin slices. Journal of Food Process Engineering, [S. l.], v. 41, n. 3, p. e12662, 2018. DOI: https://doi.org/10.1111/jfpe.12662.

[2] AKTER, M. *et al.* Design, Fabrication, and Performance Evaluation of a Food Solar Dryer. Applied System Innovation, v. 6, n. 4, p. 257, 2024. DOI: 10.3390/asi6040257. Disponível em: https://www.mdpi.com/2624-7402/6/4/257. Acesso em: 29 mar. 2026.

[3] ALTAF, A. *et al.* Phytochemical Potential and Biological Activity of Pumpkin: A Review. Food Safety and Health, [s. l.], v. 3, n. 3, p. 188-201, 2025. DOI: https://doi.org/10.1002/fsh3.70001

[4] AMARO, G.B. *et al.* Recomendações técnicas para o cultivo de abóboras e morangas. Brasília, DF: Embrapa Hortaliças, 2021. 25 p. (Circular Técnica, 175). Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1134117/1/CT-175-30ago2021.pdf. Acesso em: 28 março 2026.

[5] AN, J. *et al.* A review of applications of energy analysis: Grain, fruit and vegetable drying technology. Energy Reports, v. 12, p. 5482-5506, 2024. DOI: 10.1016/j.egyr.2024.11.019. Disponível em:

[6] https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484724007583. Acesso em: 29 março 2026.

[7] ANDO, Y.; OKUNISHI, T.; OKADOME, H. Influences of blanching and freezing pretreatments on moisture diffusivity and quality attributes of pumpkin slices during convective air-drying. Food and Bioprocess Technology, [S. l.], v. 12, n. 11, p. 1821-1831, 2019. DOI: https://doi.org/10.1007/s11947-019-02340-9.

[8] ANDO, Y.; OKUNISHI, T.; OKADOME, H. Influences of Blanching and Freezing Pretreatments on Moisture Diffusivity and Quality Attributes of Pumpkin Slices During Convective Air-Drying. Food and Bioprocess Technology, v. 12, n. 11, p. 1821–1831, 2 set. 2019.

[9] ANDRADE, S.C. O potencial de métodos de desidratação como processo para a elaboração de produtos de alto valor agregado a partir de grumixama (Eugenia brasiliensis Lamarck). 2023. 112 f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2023. Disponível em: https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/262870. Acesso em: 24 mar. 2026.

[10] ARSLAN, A.; ALIBAŞ, İ. Assessing the effects of different drying methods and minimal processing on the sustainability of the organic food quality. Innovative Food Science & Emerging Technologies, [S. l.], v. 94, p. 103681, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ifset.2024.103681

[11] BHATTA, S.; STEVANOVIC JANEZIC, T.; RATTI, C. Freeze-Drying of Plant-Based Foods. Foods, [s. l.], v. 9, n. 1, p. 87, jan. 2020. Disponível em:

[12] https://doi.org/10.3390/foods9010087. Acesso em: 22 mar. 2026.

[13] CHIKPAH, S.K. *et al.* Colour change kinetics of pumpkin (Cucurbita moschata) slices during convective air drying and bioactive compounds of the dried products. Journal of Agriculture and Food Research, v. 10, p. 100409, dez. 2022.

[14] DOTTO, J.M.; CHACHA, J.S. The potential of pumpkin seeds as a functional food ingredient: A review. Scientific African, [s. l.], v. 10, p. e00575, nov. 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00575.

[15] FELLOWS, PJ. Tecnologia do processamento de alimentos: princípios e prática, Porto Alegre: Ed. Grupo A, 2019. E-book. ISBN 9788582715260. Disponível em: https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788582715260/.

[16] GHABOOS, S.H.H. *et al.* Combined infrared-vacuum drying of pumpkin slices. Journal of Food Science and Technology, v. 53, n. 5, p. 2380–2388, maio 2016.

[17] IBRAHIM, A. *et al.* Drying Technology Evolution and Global Concerns Related to Food Security and Sustainability. In: TUMULURU, J. S. (ed.). Food Processing and Packaging Technologies: Recent Advances. London: IntechOpen, 2023. DOI: 10.5772/intechopen.109196.

[18] JOUDI-SARIGHAYEH, F. *et al.* The Optimization of the Physical–Thermal and Bioactive Properties of Pumpkin Slices Dried in a Hybrid Microwave–Convective Dryer Using the Response Surface Method. Agronomy, v. 12, n. 10, p. 2291, 1 out. 2022.

[19] JUNQUEIRA, J.R.J.; CORRÊA, J.L.G.; ERNESTO, D.B. Microwave, convective, and intermittent microwave-convective drying of pulsed vacuum osmodehydrated pumpkin slices. Journal of Food Processing and Preservation, v. 41, n. 6, p. e13250, 24 fev. 2017.

[20] KARABACAK, A.Ö. *et al.* A Review of Emerging Technologies on the Rehydration Behavior of Foodstuffs. Journal of Food Process Engineering, v. 48, n. 2, p. e70031, 2025. DOI: 10.1111/jfpe.70031. Acesso em: 29 março 2026.

[21] KÖPRÜALAN, Ö. *et al.* Effect of hybrid drying method on physical, textural and antioxidant properties of pumpkin chips. Journal of Food Measurement and Characterization, v. 15, n. 4, p. 2995–3004, 21 março 2021.

[22] KULCZYŃSKI, B.; SIDOR, A.; GRAMZA-MICHAŁOWSKA, A. Antioxidant potential of phytochemicals in pumpkin varieties belonging to Cucurbita moschata and Cucurbita pepo species. CyTA - Journal of Food, [s. l.], v. 18, n. 1, p. 472-484, 2020. DOI: https://doi.org/10.1080/19476337.2020.1778092

[23] LECH, K. *et al.* The Effect of Selected Fruit Juice Concentrates Used as Osmotic Agents on the Drying Kinetics and Chemical Properties of Vacuum-Microwave Drying of Pumpkin. Journal of Food Quality, v. 2018, p. 1–11, 2018.

[24] LIMA, P. M.; VIANA, K.S.; BALBINO, D.F.; FERREIRA, R.; PIRES, C.R.F.; FANTE, C.A. Nutritional value and modelling of carotenoids extraction from pumpkin (Cucurbita moschata) peel flour by-product. International Journal of Food Engineering, v. 15, n. 5-6, p. 1-15, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1515/ijfe-2018-0381.

[25] MAHIUDDIN, M.; KHAN, M. I. H.; KUMAR, C.; RAHMAN, M. M.; KARIM, M. A. Shrinkage of Food Materials During Drying: Current Status and Challenges. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, v. 17, n. 5, p. 1113-1126, 2018.

[26] MKHIZE, X.; NKOSI, N.; ZONDI, L.; TUMBA, K. Convective drying of pumpkin: Brief literature review and new data for organically produced indigenous pumpkin (Cucurbita pepo L.) over an expanded temperature range. Journal of Agriculture and Food Research, v. 14, 100800, 2023. DOI: 10.1016/j.jafr.2023.100800.

[27] MOHAMMED, H. H. *et al.* Effect of Pretreatments and Solar Tunnel Dryer Zone on Drying Characteristics and Stability of Pumpkin (Cucurbita maxima) Slices. International Journal of Food Science, v. 2022, p. 1–13, 16 set. 2022.

[28] MONTEIRO, R. L. *et al.* Effect of multi-flash drying and microwave vacuum drying on the microstructure and texture of pumpkin slices. LWT, v. 96, p. 612–619, out. 2018.

[29] MURATORE, G.; RESTUCCIA, C.; LICCIARDELLO, F.; LOMBARDO, S.; PANDINO, G.; MAUROMICALE, G. Effect of packaging film and antibrowning solution on quality maintenance of minimally processed globe artichoke heads. Innovative Food Science and Emerging Technologies, v. 31, p. 97–104, 2015.

[30] NASRI, H. *et al.* New concepts in nutraceuticals as alternative for pharmaceuticals. International Journal of Preventive Medicine, [s. l.], v. 5, n. 12, p. 1487-1499, 2014. Disponível em: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4293684/. Acesso em: 22 março 2026.

[31] NEPA. UNICAMP. Tabela Brasileira de Composição de Alimentos. 4. ed. rev. e ampl. Campinas: NEPA - UNICAMP, 2011. 161 p.

[32] NOWACKA, M. *et al.* Development of drying and roasting processes for the production of plant-based pro-healthy snacks in the light of nutritional trends and sustainable techniques. NFS Journal, v. 35, p. 100177, 2024. DOI: 10.1016/j.nfs.2024.100177. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924224424002292. Acesso em: 29 mar. 2026.

[33] ORREGO, C.E.; SALGADO, N.; SARMIENTO, L.F. Freeze drying and vacuum drying. In: JAFARI, S. M.; MALEKJANI, N. (ed.). Drying Technology in Food Processing. [s. l.]: Woodhead Publishing, 2023. p. 203-240.

[34] OUYANG, M. *et al.* Stability of carotenoids and carotenoid esters in pumpkin (Cucurbita maxima) slices during hot air drying. Food Chemistry, v. 367, p. 130710, jan. 2022.

[35] PANIGRAHI, S.S. *et al.* Next-Generation Food Drying: Specialized and Smart Approaches to Boost Efficiency and Quality. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, v. 24, n. 5, p. e70269, 2025. DOI: 10.1111/1541-4337.70269. Disponível em: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40923131/. Acesso em: 29 março 2026.

[36] PIEPIORKA-STEPUK, J. *et al.* The effect of heat treatment on bioactive compounds and color of selected pumpkin cultivars. LWT - Food Science and Technology, [S. l.], v. 175, p. 114469, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114469.

[37] QIU, L. *et al.* Innovative technologies for producing and preserving intermediate moisture foods: A review. Food Research International, [S. l.], v. 116, p. 90-102, 2019. DOI: 10.1016/j.foodres.2018.12.055. Disponível em:

[38] https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963996918309066. Acesso em: 29 março 2026.

[39] RAMACHANDRAN, R. P. *et al.* Advancement and Innovations in Drying of Biopharmaceuticals, Nutraceuticals, and Functional Foods. Food Engineering Reviews, v. 16, p. 540-566, 2024. DOI: 10.1007/s12393-024-09381-7. Acesso em: 29 março 2026.

[40] RAMBO, J.R.; LAFORGA, G.; SANTI, A. Custo de Produção e Análise Econômica de Abóbora em Tangará da Serra-MT. Revista Científica da Fundação Educacional de Ituverava, Ituverava, v.16, n.2, out. 2019.

[41] RIAZ, S. *et al.* Food Dehydration: Recent Advances and Approaches. In: Drying Science and Technology. London: IntechOpen, 2022. DOI: 10.5772/intechopen.108649. Disponível em: https://www.intechopen.com/chapters/85141. Acesso em: 29 março 2026.

[42] SALEENA, P.; JAYASHREE, E.; ANEES, K. Recent developments in osmotic dehydration of fruits and vegetables: A review. The Pharma Innovation Journal, [S. l.], v. 11, n. 2, p. 40-50, 2021.

[43] SERCAN SABANCI; TUĞÇE TÜRKOĞLU; SAFIYE NUR DIRIM. Determination of shrinkage characteristics of pumpkin discs during convection, microwave, and combined drying using computer-aided technique: Image processing application. Journal of Food Process Engineering, v. 46, n. 8, 31 maio 2023.

[44] SEREMET, L. *et al.* Effect of different drying methods on moisture ratio and rehydration of pumpkin slices. Food Chemistry, v. 195, p. 104–109, mar. 2016.

[45] SIDDIQUI, S. A.; SHRESTHA, P.; AWAD, N. M. H.; MORTAS, M.; POVETKIN, S. N.; PATHARE, P. B. A Review on Textural Quality Analysis of Dried Food Products. Food Reviews International, v. 40, n. 7, p. 1854-1874, 2023.

[46] SKÅRA, T. *et al.* Drying of vegetable and root crops: A review of current technologies and future perspectives. Food Reviews International, 2023. DOI: 10.1080/87559129.2022.2148688

[47] SONG, J. *et al.* Degradation of carotenoids in pumpkin (Cucurbita maximaL.) slices as influenced by microwave vacuum drying. International Journal of Food Properties, v. 20, n. 7, p. 1479–1487, 2 ago. 2016.

[48] SÜFER, Ö.; DEMIR, H.; SEZER, S. Convective and microwave drying of onion slices regarding texture attributes. Czech Journal of Food Sciences, v. 36, n. 2, p. 187-193, 2018.

[49] TÉLLEZ-PÉREZ, C. *et al.* Instant Controlled Pressure-Drop DIC as a Strategic Technology for

Different Types of Natural Functional Foods. In: LAGOURI, V. (ed.). Functional Foods. London: IntechOpen, 2019. DOI: 10.5772/intechopen.81740. Disponível em: https://www.intechopen.com/chapters/64935. Acesso em: 29 mar. 2026.

[50] USDA. United States Department of Agriculture. Agricultural Research Service. National Nutrient Database for Standard Reference, release 28, 2015.

[51] ZHANG, Z.Y. *et al.* Evaluation of the impact of food matrix change on the in vitro bioaccessibility of carotenoids in pumpkin (Cucurbita moschata) slices during two drying processes. Food & Function, v. 8, n. 12, p. 46.

Capítulo 6

Analysis of pollution at nine points along the Paraíba do Sul river using multivariate statistical techniques

Nilo Antonio de Souza Sampaio
Adir Faturi Filho
Hugo Pimentel Tavares

Abstract: The aim of this study is to accurately analyze water quality at strategic monitoring points over a decade through the combined use of statistical methods in the Paraíba do Sul River Basin in the Fluminense region of the state of Rio de Janeiro, Brazil. PCA was invented in 1901 by Karl Pearson and today, it is most used as a tool for Exploratory Data Analysis and for making predictive models. PCA can be done by decomposing a covariance matrix into eigenvalues, usually after centering (and normalizing or using Z-scores) the data matrix for each attribute. The data was obtained from the INEA and ANA agencies over a decade at nine points on the Paraíba do Sul River and treated with Multivariate Statistics. This study showed the adverse effects included the concentration of pollutants, the silting up of the river, the reduction in oxygen and the increase in water temperature, all reflected in sharp drops in the WQI. The use cases of Multivariate Statistics are multiplying in the scientific literature and are proving to be highly effective in dealing with data where the assumptions of Normality are confirmed. Despite being well-known statistical tools, Factor Maps are widely used and can bring innovations to their application, as in the case of environmental variables.

Keywords: Multivariate Statistics, Factor Map, River, Environmental Variables

1. INTRODUCTION

During the last century, statistics revolutionized science by presenting useful models that modernized the research process in the direction of better research parameters, making it possible toguide decision making in a wide variety of areas. Statistical methods were developed as a mixture of science and logic for the solution and investigation of problems in various areas of human knowledge (Abraão et al., 2024; Akdur, 2022; Antonio et al., 2023; Borges et al., 2024; de Araújo et al., 2021; Mazza et al., 2022, 2024; N. A. S. Sampaio, Mazza, Siqueira, et al., 2024; Nilo Antonio de Souza Sampaio et al., 2024; Silva et al., 2023)

The launch of a new product and/or process usually involves working with a large number of variables. Conscientious planning of the experiments that must be used to manipulate these variables and arrive at the desired answers is indispensable if reliable results are to be obtained and if consistent statistical analyses are to be carried out. In this context, it is no longer possible to develop products and processes empirically as was done in the past. The strong competition, the diffusion of technological processes and the responsibility of the scientific community now make such procedures impossible. The optimization of processes and products requires more than ever a robust statistical study (Cardoso et al., 2022; Carvalho, 2023; da Motta Reis et al., 2023; De Almeida et al., 2020; Espuny et al., 2023; F. da S. Gomes et al., 2022; F. M. Gomes et al., 2023; Junior et al., 2023; Roberto Campos Leoni et al., 2017; Reis et al., 2024; Sales et al., 2022; N. A. S. Sampaio, Mazza, Siqueira, et al., 2024; Nilo Antônio de Souza Sampaio, Carvalho, et al., 2025; Vasconcelos et al., 2024).

Multivariate statistical methods and multivariate statistical analysis tools study the behavior of three or more variables simultaneously. They are used mainly to find the least representative variable and eliminate it, simplifying statistical models, where the number of variables becomes a problem to understand the relationship between the various groups of variables (R.C. Leoni et al., 2017)

The aim of this study is to accurately analyze water quality at strategic monitoring points over a decade through the combined use of statistical methods.

2. THEORETICAL BACKGROUND

Various methods of statistical analysis can be used to determine the degree of similarity between related species. One of the most widely applied methods is cluster analysis. Hierarchical cluster analysis, which determines on an input basis the similarity of a particular input with respect to other inputs, seems particularly useful. This statistic has several advantages. First, it allows for the mixing of both qualitative and quantitative data, and therefore all available information about the sample can beused. In addition, each input is treated as an individual entity of equal weight in the analysis, unlike a number of other multivariate techniques that rely on variation across groups of inputs(Antônio, Sampaio, Caraschi, Miranda, Carina, Galli, Bezerra, et al., 2025; Antônio, Sampaio, Caraschi, Miranda, Carina, Galli, Helenita, et al., 2025; Antônio, Sampaio, Sérgio, et al., 2025; Chakraborty et al., 2018; Mazza et al., 2024; Peeters & Martinelli, 1989; N. A. S. Sampaio, Mazza, Sérgio, et al., 2024; Nilo Antonio de Souza Sampaio et al., 2024; Nilo Antônio de Souza Sampaio, Carvalho, et al., 2025; Nilo Antônio de Souza Sampaio, Silva, et al., 2025).

Multivariate statistical analysis was previously applied to evaluate water quality parameters in urban water bodies highlighting how anthropogenic actions, land use, and occupation influence surface water. This study used methods such as principal component analysis (PCA) and hierarchical clustering (HCA) to identify quality patterns and their relationship with pollution sources, highlighting the significant impact of urbanization on the deterioration of water resources (Abraão et al., 2025).

Although the multivariate methods proved efficient in identifying patterns, the model used is limited to retrospective analysis without predicting future water quality. Applied probability curves of water quality parameters as a subsidy forthe legal classification of water bodies (Guimarães et al., 2016) . Their study proposed using probabilistic statistics to estimate the frequency with which quality parameters meetthe standards established by environmental legislation.

Their study proposed using probabilistic statistics to estimate the frequency with which quality parameters meetthe standards established by environmental legislation. Although effective for identifying trends and helping to classify water bodies into specific classes, this approach lacks mechanisms for predicting future changes or the impacts of extreme climatic events, such as droughts or floods (Abraão et al., 2024).

PCA was invented in 1901 by Karl Pearson and today, it is most used as a tool for Exploratory Data Analysis and for making predictive models. PCA can be done by decomposing a covariance matrix into eigenvalues, usually after centering (and normalizing or using Z-scores) the data matrix for each attribute (Derksen et al., 2000; Febriani et al., 2020; Semagn et al., 2000).

It is a mathematical procedure that uses an orthogonal transformation (orthogonalization of vectors) to convert a set of observations of possibly correlated variables into a set of values of linearly uncorrelated variables called principal components. The number of principal components is always less than or equal to the number of original variables. Principal components are independent only if the data are normally (jointly) distributed. PCA is sensitive to the relative scale of the original variables. Depending on the application area, PCA is also known as the discrete Karhunen-Loève transform (KLT), the Hotelling transform or the proper orthogonal decomposition (POD) (Mazza et al., 2022; Mo et al., 2017). PCA describes, in geometric terms of principal components, the covariance of variables (in this case, the RGB channels) using the smallest number of eigenvectors The new subsystem then consists of the axes of the principal components, and the coordinates of the samples on these new axes are called scores. Since each principal component is a linear combination of the original variables, the coefficients of these variables (i.e. the eigenvectors) are called loadings (Godinho et al., 2008).

Principal component analysis (PCA) is one of the most common methods used in information analysis and is used for its ability to understand data due to the existence of correlation among several measured variables (Coelho de Oliveira et al., 2017).

3. MATERIALS AND METHODS

This work can be classified as applied research, as it aims to provide improvements in the current literature, with normative empirical objectives, aiming at the development of policies and strategies that improve the current situation (Bertrand & Fransoo, 2002; de Araújo et al., 2021). The approach to the problem is quantitative, as is the modeling and simulation research method. The research stages were carried out following the sequence shown in Figure 1

Figure 1 *Research method steps*

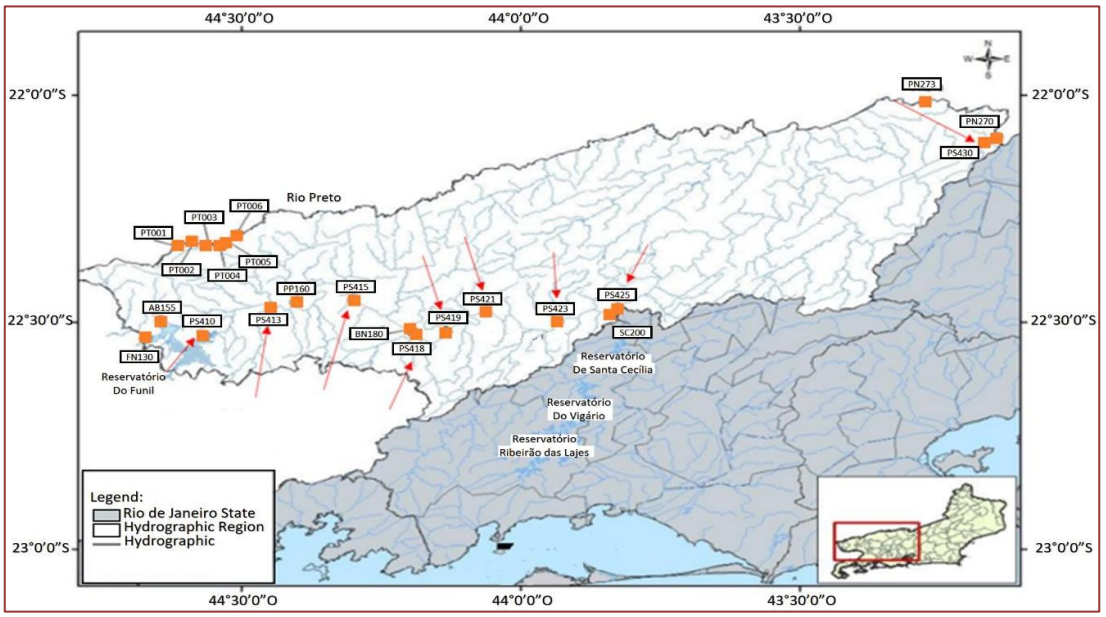
Step 1: Samples were taken from nine points on the Paraíba do Sul River over a decade (2012-2022) and the data was processed using Multivariate Statistics.	**Step 2:** PCA and Box Plot were performed to statistically analyze the samples from the nine points using R Statistical Software.	**Step 3:** Interpretation of statistical analyses carried out.
Step 4: Discussion interpretation results was comparison literature.	**Step 5:** Suggestions were for future work.	**Step 6:** The Final Considerations of the work were drafted.

Source: Authors (2025).

The Middle Paraíba do Sul is a region located in the state of Rio de Janeiro, Brazil, and is crossed by the Paraíba do Sul River, as mentioned above. Throughout this region, there are several water collection points, which are essential for supplying the cities, the industrial sector, agriculture and other activities that depend on this vital resource (Pessoa et al., 2020).

Figure 1 shows INEA's water quality monitoring stations in hydrographic region III of the Paraíba do Sul River. The 9 points cover the municipalities of Resende, Porto Real, Barra Mansa, Volta Redonda, Barra do Piraí, and Três Rios (Instituto Estadual do Ambiente, 2024). These municipalities are located in an area marked by significant industrial and agricultural activities, which contribute to both point and diffuse pollution. The data are essential for assessing long-term trends in water quality and informing environmental management strategies in the region.

Figura 1 *Paraíba do Sul Water Monitoring Stations (PS410, PS413, PS415, PS418, PS419, PS421, PS423, PS425 AND PS430) (INEA, 2022)*



Source: (Authors, 2023)

The NSF (National Sanitation Foundation) Water Quality Index (WQI) is a methodology used to calculate water quality based on different analysis parameters. This index is widely used to assess and compare water quality in bodies of water such as rivers, lakes and reservoirs.

Calculating the NSF WQI involves measuring various water quality parameters, such as organic oxygen, pH, turbidity, suspended solids, fecal coliforms, among others. Each parameter is given a specific weight according to its importance in overall water quality.

The weights assigned to each parameter may vary according to the specific version of the NSF WQI (Table 1). Generally, however, there are three variables that have the greatest weight in the calculation of the WQI:

Table 1 *NSF WQI Variable Weights*

Variables - WQI NSF	Unit of Measure	Weights (wi)
Coliforms Thermotolerant	NMP/100 mL	0.16
DBO	mg/L CO2	0.11
Total Phosphate	mg/L	0.10
Nitrates	mg/L	0.10
Dissolved Oxygen	%Saturação	0.17
pH	-	0.11
Total Dissolved Solids	mg/L	0.07
Average Temperature	°C	0.10
Turbidity	uT	0.08

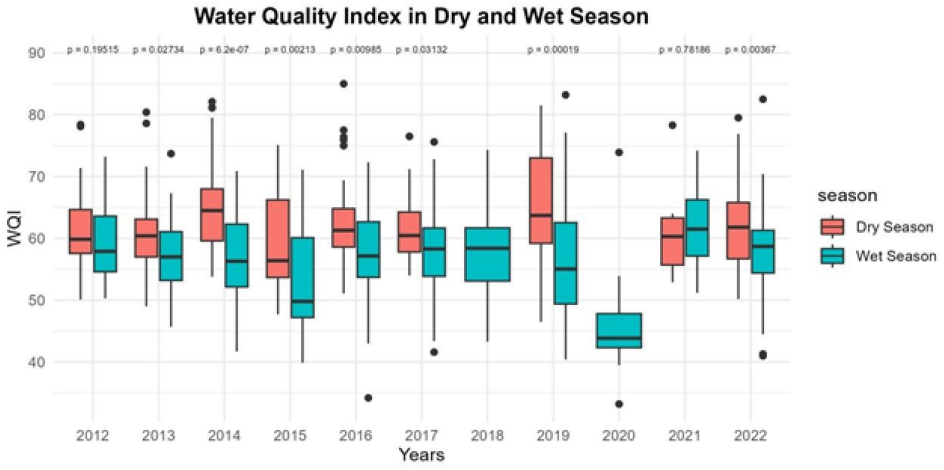
Source: INEA, 2023.

4. RESULTS AND DISCUSSION

Considering that the climate of the region studied is classified as tropical humid, with two distinct seasons: a dry season (from May to September) and a rainy season (from October to April), the WQI Temporal Analysis was divided into dry and rainy seasons (Njuguna et al., 2019).

In Figure 2, the graph shows the water quality indicators in the dry and rainy seasons over ten years, from 2012 to 2022, for the Paraíba do Sul River, considering the average annual values for the nine sampling points.

Figura 1 *Average WQI values from INEA's Paraíba do Sul Water Monitoring Stations*



EXCELLENT	100 ≥ WQI ≥ 90
GOOD	90 > WQI ≥ 70
AVERAGE	70 > WQI ≥ 50
BAD	50 > WQI ≥ 25
VERY BAD	25 > WQI ≥ 0

Source: (Authors, 2023)

Data collection was interrupted by the COVID-19 pandemic in 2020, resulting in only three recorded sampling campaigns, all during the rainy season. This justifies the absence of the Boxplot for the dry season in this year's graph. These gaps in data collection have an essential impact on the analysis, mainly due to the lack of complete seasonal information. The unavailability of dry season data this year prevents a proper assessment of the variations between seasons, which is crucial to understanding how climatic factors affect water quality. Without this data, the interpretation of seasonal and inter-annual trends is hampered, which can lead to partial or less reliable conclusions about pollution patterns, discharge regimes or process efficiency.

In addition, the gaps make it more difficult to validate predictive models or simulations since a database is incomplete and cannot represent behavior in different environmental conditions. Limitations can also arise when comparing with other years, compromising analyses that rely on continuous historical series. These restrictions are particularly relevant for long-term monitoring studies and for decision-making in environmental management policies.

The 2014/2015 drought was an extreme weather event that caused significant impacts on the Paraíba do Sul river basin. The temporal graph shows that the WQI in the dry season of that year was much higher than in the rainy season, which is a significant difference that indicates that the river's water quality was noticeably impaired by the lack of rainfall predicted for the rainy season or by the lack of adequate flow control in the existing dams in the area (Vieira, 2008). This reduction in water flow affected water quality since the concentration of pollutants increased in the river. This resulted from less dilution of the same load of pollutants in the water (Massone & dos Santos, A. A., Ferreira, P. G., & Carreira, 2023).

Table 1 shows the results of the Paired T-Test for the difference in the WQI averages for all the years of the decade. Where the PValue was more significant than 0.05 (5%), the null hypothesis is accepted, i.e., no difference between the dry and wet seasons exists. Where the PValue was less than 0.05 (5%), the null hypothesis is rejected, so there is a difference between the dry and wet seasons. Most of the years observed showed a significant difference between the dry and wet seasons. In particular, the year 2014 was atypical in that the difference between the averages was huge due to the severe drought that occurred that year, as explained above (Tokuda et al., 2023).

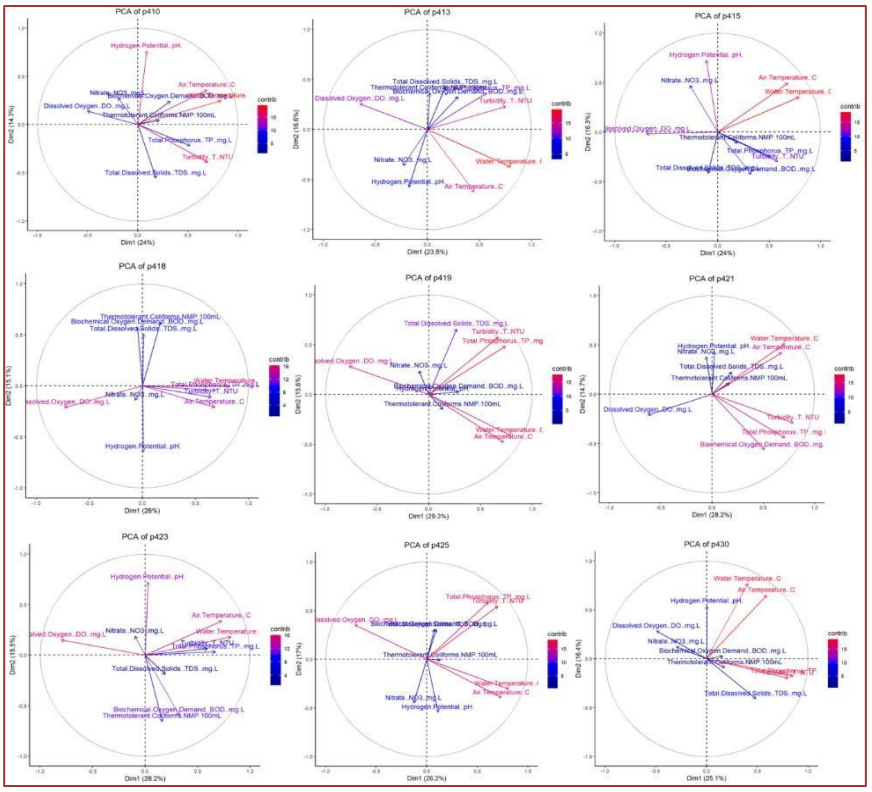
Principal Component Analysis (PCA) is a data analysis technique that reduces the dimensionality of a data set. This is done by identifying the main components of the data set, which are the variables that explain most of the variance in the data.

The arrows on a PCA graph represent the projections of the original observations onto the new main axes. Nearby arrows indicate that the observations are similar in terms of the variables that explain most of the variance in the data. Opposite arrows indicate that the observations are different in terms of these variables.

The relationship between the arrows and the principal components is that the arrows point in the direction of the principal components. The magnitude of the arrow indicates the importance of the principal component for the observation.

Figure 2 shows the PCAs of each point studied so far, and the relationship between the arrows that represent the components that make up the IQA will be explained point by point.

Figura 2 *PCA's of the nine points studied on the Paraíba do Sul River.*



Source: (Authors, 2023)

pH and Dissolved Solids: There is no correlation between these two parameters, as they are affected by different factors. pH is a measure of the acidity of the solution, while dissolved solids are affected by factors such as geology, vegetation, climate and human activities.

Turbidity and Phosphorus: There is a correlation between turbidity and phosphorus as shown at all the Collection Points, as turbidity can increase the concentration of phosphorus in the water. This can occur due to the blocking of sunlight, hindering the photosynthesis of aquatic plants, and the difficulty of water treatment filters in removing phosphorus. 25

Water and Air Temperature and Dissolved Oxygen: The temperature of water and air are correlated, affecting the solubility of oxygen in water. The warmer the water, the lower the solubility of oxygen. Therefore, as water temperature increases, dissolved oxygen decreases.

Nitrate (NO3-) and Biochemical Oxygen Demand (BOD): Nitrate and BOD are correlated due to the influence of organic matter in the water. BOD is a measure of the oxygen consumed by the decomposition of organic matter, while nitrate can be produced as a result of this process.

Dissolved Oxygen and Nitrate (NO3-): There is no correlation between these two parameters, as they are affected by different factors. Dissolved oxygen is influenced by water temperature, salinity, turbidity and the presence of pollutants, while nitrate is affected by water temperature, the presence of organic matter and the presence of nitrifying bacteria.

Contribution to the Water Quality Index (IQA): Some parameters, such as turbidity, phosphorus, BOD and water and air temperature, have a greater contribution to the WQI through the weights of the calculations, thus significantly influencing the quality of water for human consumption and aquatic life.

PS418 e PS419:

Both have a correlation between water temperature, air temperature, turbidity and total phosphorus due to the influence of similar factors, such as heat exchange and the presence of organic matter in the water and the industrialization of the site 26.

PS415 e PS430:

Both PS415 and PS430 point out that dissolved oxygen (DO) is not correlated with other parameters, as it is affected by factors other than those affecting turbidity, total phosphorus, water and air temperature, as well as nitrate (NO3-), which also does not correlate with DO.

PS419 e PS425:

Both PS419 and PS425 have a correlation between turbidity and total phosphorus due to the presence of organic matter in the water, cities with more agricultural activities.

PS421 e PS423:

Both PS421 and PS423 highlight the correlation between turbidity, total phosphorus and biochemical oxygen demand (BOD), as well as the importance of these parameters for the Water Quality Index (IQA). They also mention the correlation between water temperature, air temperature and these parameters, due to their influence on water quality.

5. FINAL CONSIDERATIONS

The temporal analysis of the dry and rainy seasons of the Paraíba do Sul River, together with the assessment of the Water Quality Index (WQI) at the nine points studied, offers deep insights into the dynamics and challenges faced by the river basin. The study highlighted the significant influence of extreme weather events, such as the 2014/2015 drought, which left deep marks on water quality, directly impacting the Paraíba do Sul River. The adverse effects included the concentration of pollutants, siltation of the river, a reduction in oxygen and an increase in water temperature, all reflected in sharp drops in theWQI.

REFERENCIAS

[1] Abraão, R. P., Sampaio, N. A. de S., & Mühlen, C. von. (2025). *Statistical analysis and prediction via neural networks of water quality in the Middle Paraíba do Sul (Rio de Janeiro State , Brazil) region in the period (2012 – 2022). 0123456789*. https://doi.org/10.1007/s11356-025-36276-9

[2] Abraão, R. P., Sampaio, N. A. S., Von Mühlen, C., Reis, J. S. da M., Colombari, C. V., & Dantas, C. L. R. (2024). Análise Bibliométrica da Qualidade da Água: Uma Perspectiva para a Preservação Ambiental. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, *18*(2), e05018. https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n2-096

[3] Akdur, H. T. K. (2022). Comparison of non-parametric tests of ordered alternatives for repeated measures in randomized blocks. *Communications in Statistics: Simulation and Computation*, *51*(7), 4146–4158. https://doi.org/10.1080/03610918.2020.1740262

[4] Antônio, N., Sampaio, D. S., Caraschi, J. C., Miranda, F. F. De, Carina, L., Galli, A., Bezerra, G. A., &

Vieira, M. R. (2025). *USING A FULL FACTORIAL EXPERIMENT TO OPTIMIZE THE PERFORMANCE OF AN INDUSTRIAL CHEMICAL PROCESS*. 1–12.

[5] Antônio, N., Sampaio, D. S., Caraschi, J. C., Miranda, F. F. De, Carina, L., Galli, A., Helenita, R., & Tamashiro, S. (2025). *EFFECT OF PRESSURE AND TEMPERATURE ON THE RETENTION TIME OF CRUDE OIL INSIDE THE THREE-PHASE SEPARATOR USING THE RESPONSE*. 1–14.

[6] Antonio, N., Sampaio, D. S., Salvador, J., Glenio, J., C, M. D. B., D, C. P. D. C., E, F. M. G., César, L., Motta, F., & G, M. B. S. (2023). *Multiple Response Optimization: Comparative Analysis Between Models Obtained by Ordinary Least Method and Genetic Programming*.1–23. https://doi.org/10.26668/businessreview/2023.v8i8.3131

[7] Antônio, N., Sampaio, D. S., Sérgio, S., Siqueira, S. De, Diniz, G., Mazza, F. C., Ercio, J., Junior, M., Kawakani, M. L., & Isaac, G. (2025). *APPLICATIONOF FULL FACTORIAL PLANNING TO CONTROL NITROGEN IN A WATER RESOURCE*. 1–13. https://doi.org/10.24857/rgsa.v19n1-128

[8] Bertrand, J. W. M., & Fransoo, J. C. (2002). Operations management research methodologies using quantitative modeling. *International Journal of Operations and Production Management*, *22*(2), 241–264. https://doi.org/10.1108/01443570210414338

[9] Borges, E. J., Abreu, L. D. de, Prates, G. A., Brenny, G. M., Miranda Junior, J. E., & Sampaio, N. A. de S. (2024). Using the Non-Homogeneous Poisson Process (Duane's Model) to Analyze the Number of Failures in Industrial Equipment. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, *18*(5), e07922. https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n5-188

[10] Cardoso, R. P., Reis, J. S. da M., Sampaio, N. A. de S., Barros, J. G. M. de, Barbosa, L. C. F. M., & Santos, G. (2022). Sustainable Quality Management: Unfoldings, trends and perspectives from the Triple Bottom Line. *Proceedings on Engineering Sciences*, *4*(3), 359–370. https://doi.org/10.24874/PES04.03.013

[11] Carvalho, C. P. de. (2023). *ANALYSIS OF PAYMENT METHODS FOR A CANDY DISTRIBUTOR USING BI TOOLS Cleginaldo Pereira de Carvalho A Article history : Dashboard ; Google Sheets ; Currently , companies are looking for mechanisms to stand out and gain a competitive advantage in the marketp*. *January*, 1–24. https://doi.org/10.26668/businessreview/2023.v8i3.952

[12] Chakraborty, S., Agarwal, S., & Dandge, S. S. (2018). Analysis of Cotton Fibre Properties: A Data Mining Approach. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series E*, *99*(2), 163–176. https://doi.org/10.1007/s40034-018-0125-4

[13] Coelho de Oliveira, H., Elias da Cunha Filho, J. C., Rocha, J. C., & Fernández Núñez, E. G. (2017). Rapid monitoring of beer-quality attributes based on UV-Vis spectral data. *International Journal of Food Properties*, *20*(July), 1686–1699. https://doi.org/10.1080/10942912.2017.1352602

[14] da Motta Reis, J. S., de Souza Sampaio, N. A., de Barros, J. G. M., Cardoso, R. P., Werderits, D. E., Santos, S. G., & Barbosa, L. C. F. M. (2023). Contribution of Lean Manufacturing Concepts To Reducing Waste in Destructive Testing. *Proceedings on Engineering Sciences*, *5*(4), 627–636. https://doi.org/10.24874/PES05.04.005

[15] De Almeida, M. D. G. D., Marins, F. A. S., Salgado, A. M. P., Bittar, R. D. C. D. S. M., De Barros, J. M., Junior, A. H., De Souza Sampaio, N. A., Da Fonseca, B. B., Baronto, G. N. D., & Côrtes, A. D. S. (2020). Industrial internship mentoring model for industrial engineering education in public universities. *International Journal of Engineering Education*, *36*(1A).

[16] de Araújo, M. J. F., de Araújo, M. V. F., de Araújo, A. H., de Barros, J. G. M., de Almeida, M. da G., da Fonseca, B. B., Reis, J. S. d. M., Barbosa, L. C. F. M., Santos, G., & Sampaio, N. A. S. (2021). Pollution credit certificates theory: An analysis on the quality of solid waste management in Brazil. *Quality Innovation Prosperity*, *25*(3), 1–17. https://doi.org/10.12776/qip.v25i3.1574

[17] Derksen, C., Ledrew, E., Walker, A., & Goodison, B. (2000). Winter season variability in North American prairie SWE distribution and atmospheric circulation. *Hydrological Processes*, *14*(18), 3273–3290. https://doi.org/10.1002/1099-1085(20001230)14:18<3273::AID-HYP203>3.0.CO;2-W

[18] Espuny, A. L. G., Espuny, M., Costa, A. C., da Motta Reis, J. S., de Souza Sampaio, N. A., Barbosa, L. C. F. M., Santos, G., & de Oliveira, O. J. (2023). Determinants of Intent To Purchase Organic Products To Improve Quality of Life. *International Journal for Quality Research*, *17*(2), 441–454. https://doi.org/10.24874/IJQR17.02-09

[19] Febriani, R. A., Park, H. S., & Lee, C. M. (2020). A rule-based system for quality control in brake disc

production lines. *Applied Sciences (Switzerland)*, *10*(18). https://doi.org/10.3390/APP10186565

[20] Godinho, M. D. S., Pereira, R. O., Ribeiro, K. D. O., Schimidt, F., De Oliveira, A. E., & De Oliveira, S. B. (2008). Classificação de refrigerantes através de análise de imagens e análise de componentes principais (PCA). *Quimica Nova*, *31*(6), 1485–1489. https://doi.org/10.1590/S0100-40422008000600039

[21] Gomes, F. da S., Camargo, P. R., Reis, J. S. da M., Diogo, G. M. M., Cardoso, R. P., Barros, J. G. M. de, Sampaio, N. A. de S., Barbosa, L. C. F. M., & Santos, G. (2022). The Main Benefits of Application of Six Sigma for Productive Excellence. *Quality Innovation Prosperity*, *26*(3), 151–167. https://doi.org/10.12776/qip.v26i3.1712

[22] Gomes, F. M., Ymamura, C. S., de Souza Sampaio, N. A., Pereira, F. M., Andrade, H. de S., & Silva, M. B. (2023). Optimisation of Multiple Response Processes Using Different Modelling Techniques. *Quality Innovation Prosperity*, *27*(3), 18–36. https://doi.org/10.12776/QIP.V27I3.1899

[23] Guimarães, B. O., dos Reis, J. A. T., Mendonça, A. S. F., & Akabassi, L. (2016). Análise probabilística de parâmetros de qualidade da água para suporte ao processo de enquadramento de cursos d'água. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, *21*(4), 807–815. https://doi.org/10.1590/S1413-41522016143190

[24] INEA. (2022). Avaliação diagnóstica da geração de resíduos de uma Unidade de Alimentação e Nutrição instituciona. *REVISTA INEANA*.

[25] Junior, A. M. da C., Barros, J. G. M. de, Almeida, M. da G. D. de, Carvalho, C. P. de, & Sampaio, N. A. de S. (2023). *Application of the poisson distribution in the prediction of the number of defects in a textile factory Aplicação da distribuição de poisson na predição do número de defeitos em uma fábrica têxtil*. *14*(8), 14378–14386. https://doi.org/10.7769/gesec.v14i8.2671

[26] Leoni, R.C., de Souza Sampaio, N. A., & Corrêa, S. M. (2017). Multivariate analysis applied to air quality study. *Revista Brasileira de Meteorologia*, *32*(2). https://doi.org/10.1590/0102-77863220005

[27] Leoni, Roberto Campos, de Souza Sampaio, N. A., & Corrêa, S. M. (2017). Estatística Multivariada Aplicada ao Estudo da Qualidade do Ar. *Revista Brasileira de Meteorologia*, *32*(2), 235–241. https://doi.org/10.1590/0102-77863220005

[28] Massone, C. G., & dos Santos, A. A., Ferreira, P. G., & Carreira, R. da S. (2023). ersistent Organic Pollutants (POPs) in Sardine (Sardinella brasiliensis): Biomonitoring and Potential Human Health Effects. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *3*.

[29] Mazza, F. C., de Souza Sampaio, N. A., & von Mühlen, C. (2022). Hyperspeed method for analyzing organochloride pesticides in sediments using two-dimensional gas chromatography–time-of-flight mass spectrometry. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, *0123456789*. https://doi.org/10.1007/s00216-022-04464-y

[30] Mazza, F. C., Lima, A. C. da S., Sampaio, N. A. de S., De Almeida, M. da G. D., Miranda Junior, J. E., & De Abreu, L. D. (2024). Preliminary Results of Spadns Treatment by Electroflocculation With Iron Electrodes. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, *18*(1), e04784. https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n1-068

[31] Njuguna, S. M., Onyango, J. A., Babu, K., Githaiga, R. W., & Gituru, X. Y. (2019). Application of multivariate statistical analysis and water quality index in health risk assessment by domestic use of river water. Case study of Tana River in Kenya. *Journal Pre-Proof*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.11.006

[32] Peeters, J. P., & Martinelli, J. A. (1989). Hierarchical cluster analysis as a tool to manage variation in germplasm collections. *Theoretical and Applied Genetics*, *78*(1), 42–48. https://doi.org/10.1007/BF00299751

[33] Pessoa, M. A. R., de Souza, F. J., Domingos, P., & de Azevedo, J. P. S. (2020). IQAFAL — Fuzzy water quality index for lotic environments. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, *25*(1), 21–30. https://doi.org/10.1590/s1413-41522020147587

[34] Reis, J. S. D. M., Silva, D. E. W., Sampaio, N. A. de S., Barros, J. G. M. de, Santos, G., & Barbosa, L. C. F. M. (2024). The Benefits of FMEA in Improving The Industrial Process of a Cabin Air Carrier. *Proceedings on Engineering Sciences*, *6*(3), 1031–1040. https://doi.org/10.24874/PES06.03.016

[35] Sales, J. P. de, Reis, J. S. da M., Barros, J. G. M. de, Fonseca, B. B. da, Junior, A. H. de A., Almeida, M. da G. D. de, Barbosa, L. C. F. M., Santos, G., & Sampaio, N. A. de S. (2022). Quality Management in The Contours of Continuous Product Improvement. *International Journal for Quality Research*, *16*(3), 689–702.

https://doi.org/10.24874/IJQR16.03-02

[36] Sampaio, N. A. S., Mazza, F. C., Sérgio, S., Siqueira, S. De, Abreu, L. D. De, & Lima, R. M. De. (2024). *APPLICATION OF THE NON-PARAMETRIC SIGNALS TEST TO A COMPANY João Ercio Miranda Junior 4 1 INTRODUCTION During the last century , statistics revolutionized science by presenting useful models that modernized the research process in the direction of better* . 1–13.

[37] Sampaio, N. A. S., Mazza, F. C., Siqueira, S. S. S. de, Miranda Junior, J. E., Moutinho, J. V. de S., & Pacífico, L. de O. (2024). Applications of Correlation Analysis in Environmental Problems. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, *18*(3), e04925. https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n3-085

[38] Sampaio, Nilo Antônio de Souza, Carvalho, E., Almeida, M. da G. D. de, Barros, J. G. M. de, Junior, J. E. M., Paula, E. R. M. de, & Prata, D. S. (2025). APPLYING THE MOOD MEDIAN TEST TO AN ENVIRONMENTAL PROBLEM. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, *19*(2). https://doi.org/10.24857/rgsa.v19n2-046

[39] Sampaio, Nilo Antonio de Souza, Júnior, J. E. M., Almeida, M. da G. D. de, Abreu, L. D. de, & Cardoso, R. P. (2024). Applications of Factor Analysis and Response Surface Methodology in Chemical Process Optimization Problems. *International Journal of Professional Business Revieweview*, *9*(1), 1–14. https://doi.org/10.26668/businessreview/2024.v9i1.4284

[40] Sampaio, Nilo Antônio de Souza, Silva, C. E. da, Miranda, F. F. de, Prates, G. A., Siqueira, S. S. S., De, Miranda, I. T. de, & Vieira, M. R. (2025). *USING TAGUCHI ' S EXPERIMENTS PART III : CHOOSING RAW MATERIALS ACCORDING TO PROCESS YIELDS*. 1–12.

[41] Semagn, K., Bjornstad, A., Stedje, B., & Bekele, E. (2000). Comparison of multivariate methods for the analysis of genetic resources and adaptation in Phytolacca dodecandra using RAPD. *Theoretical and Applied Genetics*, *101*(7), 1145–1154. https://doi.org/10.1007/s001220051591

[42] Silva, A. C. P. da, Pasini, V. D., Aguilera, M. V. C., Fonseca, B. B. da, Sampaio, N. A. de S., Reis, J. S. da M., Santos, G., & Barbosa, L. C. F. M. (2023). Mapping the Accidents and Unsafe Conditions of Workers in the Automotive Sector. *Quality Innovation Prosperity*, *27*(2), 139–157. https://doi.org/10.12776/QIP.V27I2.1849

[43] Tokuda, E. N., Lima, C. G. da R., & Oliveira, J. N. de. (2023). *SPATIAL AND TEMPORAL ANALYSIS OF DROUGHT EVENTS IN UPPER PARANÁ RIVER HYDROGRAPHIC REGION (BRAZIL) FROM 1990 TO 2020 Article history : 2020*, 1–23.

[44] Vasconcelos, T. R. de O., Savi, A. F., Prates, G. A., Brenny, G. M., Galli, L. C. do L. A., & Sampaio, N. A. de S. (2024). How to Perform a Statistical Analysis of Non-Destructive Degradation Data to Study Crack Growth in Wind Blades as a Function of the Number of Cycles. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, *18*(7), e08192. https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n7-169

[45] Vieira, P. de C. (2008). Avaliação das condições de qualidade da água em tempo seco e durante eventos de chuvas em uma microbacia urbanizada no município de Belo Horizonte. *UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS*, 98.

Capítulo 7

Nitrogen control in a water body using complete factorial planning

Nilo Antonio de Souza Sampaio
Gabriela Goes Mercedes
Hugo Pimentel Tavares

Abstract: The objective of this study is to demonstrate the application of Full Factorial Design to an environmental problem. Experimental design is defined as a set of statistical techniques applied to the planning, conduct, analysis, and interpretation of controlled tests, with the aim of identifying the factors that influence the values of a parameter or a group of parameters. Its basic principle allows for varying all levels of all discrete or continuous variables at once, for each experiment, in a planned and rational manner. The experiments were conducted at an industrial plant in the southern region of Rio de Janeiro, and the data were analyzed using Full Factorial Design. It can be concluded that full factorial design is a highly viable option for obtaining the optimal values or the optimal range of values to achieve the best possible response of the variable in a study. In this specific case of the company, it can be concluded that Line 1 and Line 3 are primarily responsible for the concentration of nitrogen oxide discharged into the river and, therefore, the effluents must be pretreated. The use of factorial design is becoming increasingly common in the scientific literature and has proven highly effective in data analysis where assumptions of normality are not met. Although they are well-known statistical tools, factorial designs are widely used and can bring innovations to their application, as in the case of the the company in question.

Keywords: Full Factorial Planning, Nitrogen, Water Resources, Environmental.

1. INTRODUCTION

During the last century, statistics revolutionized science by presenting useful models that modernized the research process in the direction of better research parameters, making it possible toguide decision making in a wide variety of areas. Statistical methods were developed as a mixture of science and logic for the solution and investigation of problems in various areas of human knowledge (Abraão et al., 2024; Akdur, 2022; Antonio et al., 2023; Borges et al., 2024; de Araújo et al., 2021; Mazza et al., 2022, 2024; N. A. S. Sampaio, Mazza, Siqueira, et al., 2024; Nilo Antonio de Souza Sampaio et al., 2024; Silva et al., 2023)

The launch of a new product and/or process usually involves working with a large number of variables. Conscientious planning of the experiments that must be used to manipulate these variables and arrive at the desired answers is indispensable if reliable results are to be obtained and if consistent statistical analyses are to be carried out. In this context, it is no longer possible to develop products and processes empirically as was done in the past. The strong competition, the diffusion of technological processes and the responsibility of the scientific community now make such procedures impossible. The optimization of processes and products requires more than ever a robust statistical study (Cardoso et al., 2022; Carvalho, 2023; da Motta Reis et al., 2023; De Almeida et al., 2020; Espuny et al., 2023; F. da S. Gomes et al., 2022; F. M. Gomes et al., 2023; Junior et al., 2023; Roberto Campos Leoni et al., 2017; Reis et al., 2024; Sales et al., 2022; N. A. S. Sampaio, Mazza, Siqueira, et al., 2024; Nilo Antônio de Souza Sampaio, Carvalho, et al., 2025; Vasconcelos et al., 2024).

Design of experiments is defined as a set of statistical techniques applied to planning, conducting, analyzing and interpreting controlled tests, seeking to find (define) the factors that influence the values of a parameter or a group of parameters. Its basic principle allows all levels of all variables to be varied at once. levels of all variables, discrete or continuous (called factors), in each experiment, in a programmed and rational manner. The experimenter can reduce the time and cost of work by reducing the number of experiment points per factor, without having to limit the number of factors, as is the case with the classic method of experimentation (Peixoto et al., 2008).

The aim of this article is to present the results obtained with Full Factorial Planning for a case study in a chemical industry in the southern region of Rio de Janeiro state, Brazil.

2. THEORETICAL BACKGROUND

The application of the Full Factorial Design Methodology has been used in a number of studies in the most diverse areas of science (Buragohain & Mahanta, 2008; Rakić et al., 2014; Severino et al., 2012). Design of experiments are techniques used to improve a process through experiments that indicate the effect of factors on the procedure, such as temperature, concentration of components, manufacturing speed, purity of a material, etc. It is a method of observing the results in order to act on the process, although at a certain point it is possible to include technical and scientific studies in order to help assess the influence of a factor. Among the various types of experimental planning, factorial systems stand out because they allow the effect of a large number of variables to be evaluated simultaneously number of variables, from a reduced number of experimental trials, when compared to univariate processes (Volpato et al., 2008).

The application of chemometric tools related to the factorial design of experiments is a reality in many research laboratories and also in the industrial sector. These tools have

contributed to improving manufacturing and synthesis processes, as well as rapidly proposing more sensitive analytical methods with a high sampling frequency (Pereira & Pereira-Filho, 2018).

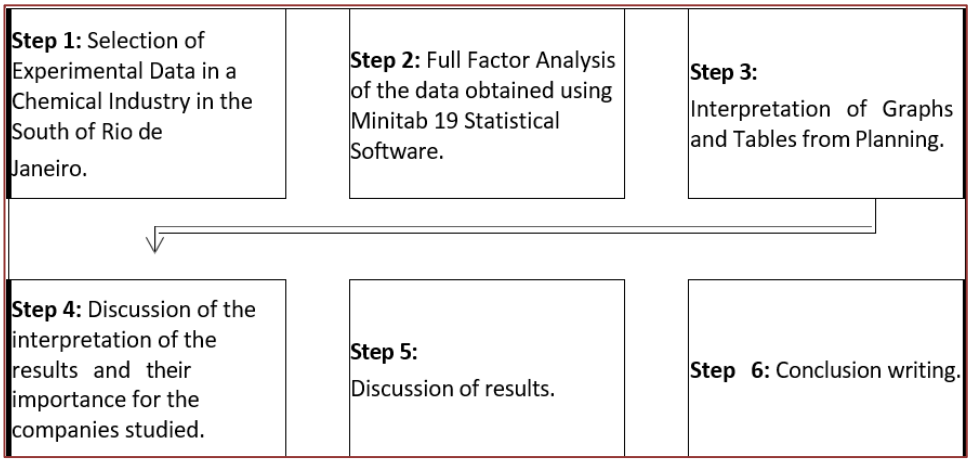
Validating processes is establishing documented evidence to ensure that a specific specific process will consistently manufacture a product according to predetermined specifications and predetermined quality characteristics. The Design of Experiments fully meets these conditions. Simply document the execution of all the planned steps and compare the level of quality achieved in the recommended parameters at the end of the experiment with the one you want to achieve. This comparison can use one or more of the known quality indicators (C. R. da Silva & Sant'Anna, 2007).

Full factorial design is an experimental design procedure in which two or more design procedure in which two or more factors, or independent variables, are discretized into levels, and the experimental points to be carried out correspond to all possible combinations of these discrete values. It is a tool that allows great savings to be made in the number of experiments needed to determine the effect of different factors on one or more controlled variables, defined as "response" and which in this work will be the yield, refractive index and viscosity of biodiesel, and which facilitates the interpretation of the results achieved in the design of the experiment, even when considering a limited range of values (Aranha & Garcia, 2020; da Motta Reis et al., 2023; de Souza Sampaio et al., 2022; F. da S. Gomes et al., 2022; Júnior & Sampaio, 2024).

3. MATERIALS AND METHODS

This work can be classified as applied research, as it aims to provide improvements in the current literature, with normative empirical objectives, aiming at the development of policies and strategies that improve the current situation (Bertrand & Fransoo, 2002; de Araújo et al., 2021). The approach to the problem is quantitative, as is the modeling and simulation research method. The research stages were carried out following the sequence shown in Figure 1.

Figure 1 *Research method steps*



Source: Authors (2025).

The study shows a case study that took place in a company in the Sul Fluminense region, in the state of Rio de Janeiro. The concentrations of the three wastes in mg/L and the respective response variable, the Nitrogen concentration in mg/L at a specific point in the river after the discharge pipes, are shown in Table 1.

Table 1: Concentrations of the 3 discharge pipes (mg/L) and the respective Response variable (Nitrogen Concentration (mg/L))

Production Waste 1	Production Waste 2	Production Waste 3	Nitrogen Oxide Concentration
10	2	9	185
16	2	9	320
10	4	9	245
16	4	9	362
10	2	11	280
16	2	11	440
10	4	11	343
16	4	11	513

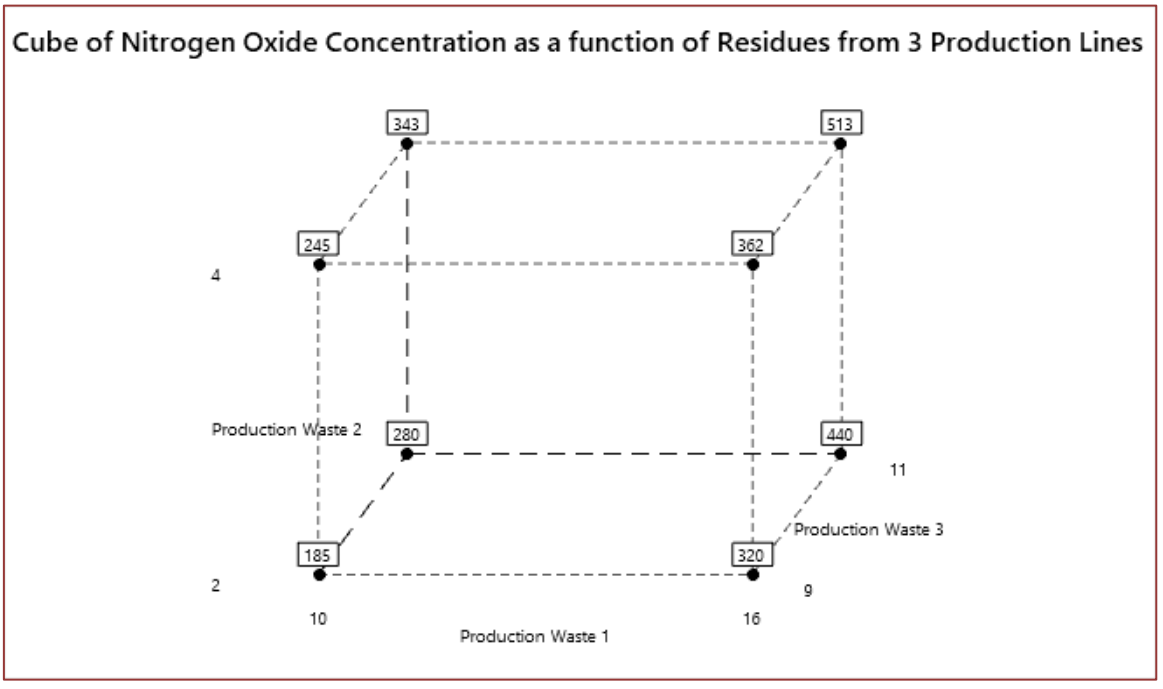
Source: Authors (2025)

4. RESULTS AND DISCUSSION

4.1. CASE 1

First, the Cube of the Nitrogen Oxide Concentration as a function of the Residue Concentration of the 3 Production Lines was carried out, as can be seen in Figure-2.

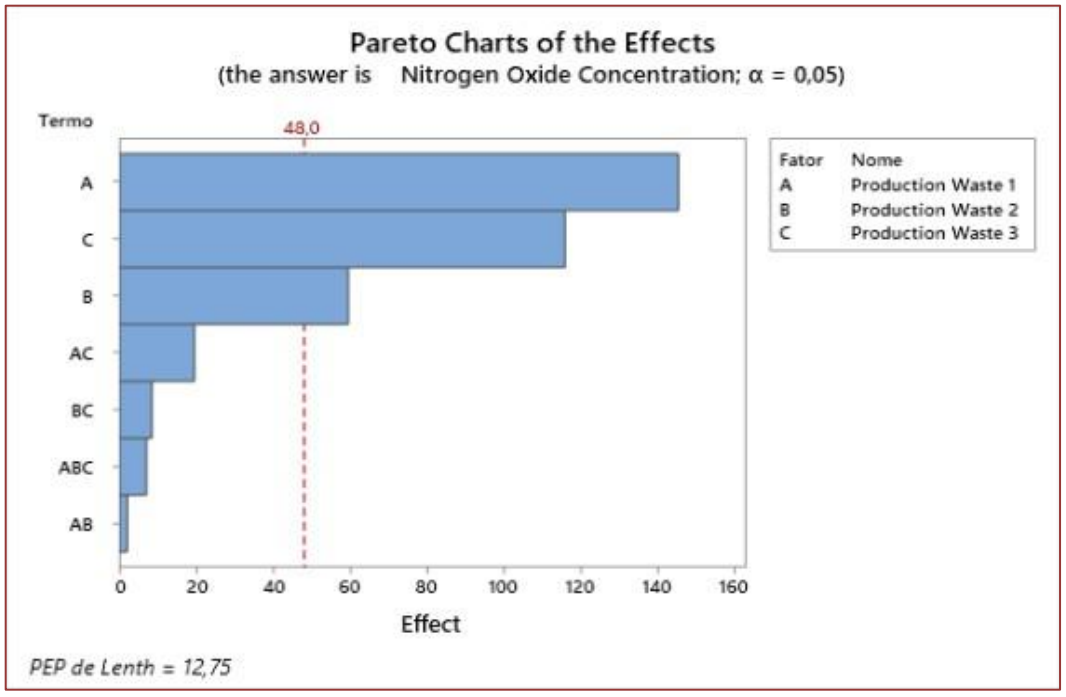
Figure 2: Cube of Nitrogen Concentration as a function of Residues from 3 Production Lines



Source: Authors (2025)

It can be seen that the lowest value of Nitrogen Oxide Concentration (185 mg/L) occurs with the concentrations of Production Lines 1,2,3 marking the values 10 mg/L, 2mg/L and 9 mg/L respectively. As it was not sufficiently clear from the cube figure which pipe is most significant for the Nitrogen Concentration in the river, which is desirable to be as low as possible, a Pareto Graph was then made to observe the influence of the 3 Factors and the possible combinations between them. The Pareto Chart can be seen in Figure 3. It can be seen that the 3 Main Factors are significant but the interactions between them are not. Therefore, it can be said that there are no significant interactions for the production of Nitrogen Oxide Concentration in the river.

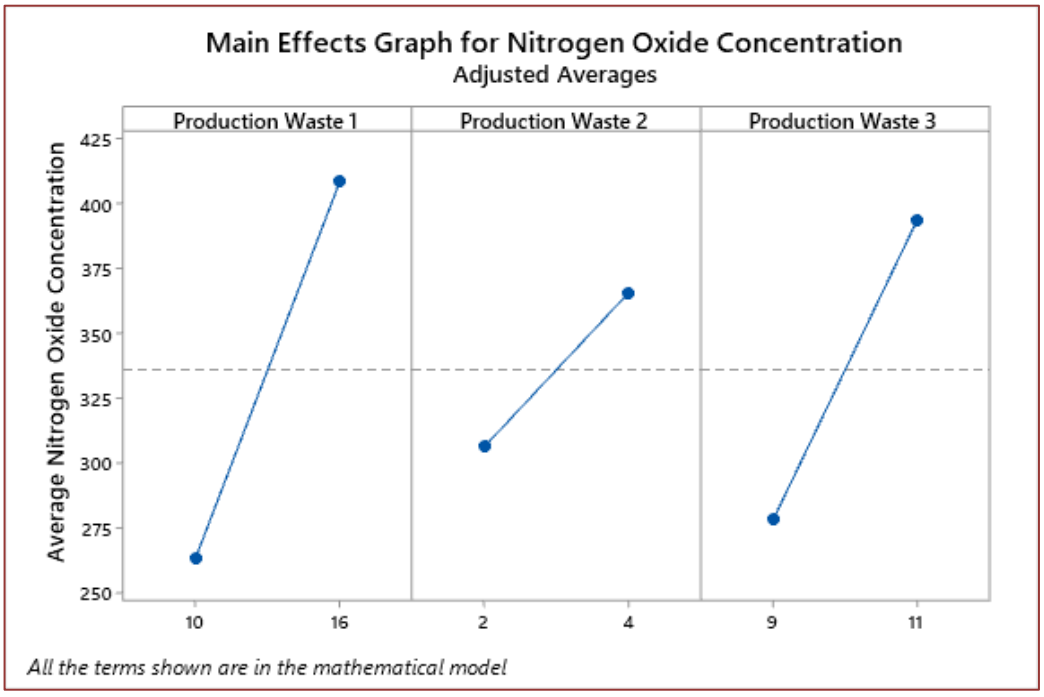
Figure 3: Pareto Charts of the Effects



Source: Authors (2025)

Once it had been proven that only the isolated Factors interfere with Nitrogen Oxide production, Factor Graphs were made to show the isolated influence of these Factors and which of them is most significant for the response variable (Nitrogen Concentration). The Factor Graph can be seen in Figure 4. It can be seen that Production Line 1 has the greatest responsibility for Nitrogen Concentration in the river, followed by Production Line 3 and finally Production Line 2. Concentrations should always be kept at the lowest levels, where the lowest concentrations of Nitrogen are obtained. In Factor 1 (line 1) the difference in Nitrogen Concentration between the high and low levels produces a difference of around 145 mg/L, in Factor 3 (line 3) this difference is around 100 mg/L and in Factor 2 there is a difference of around 40 mg/L

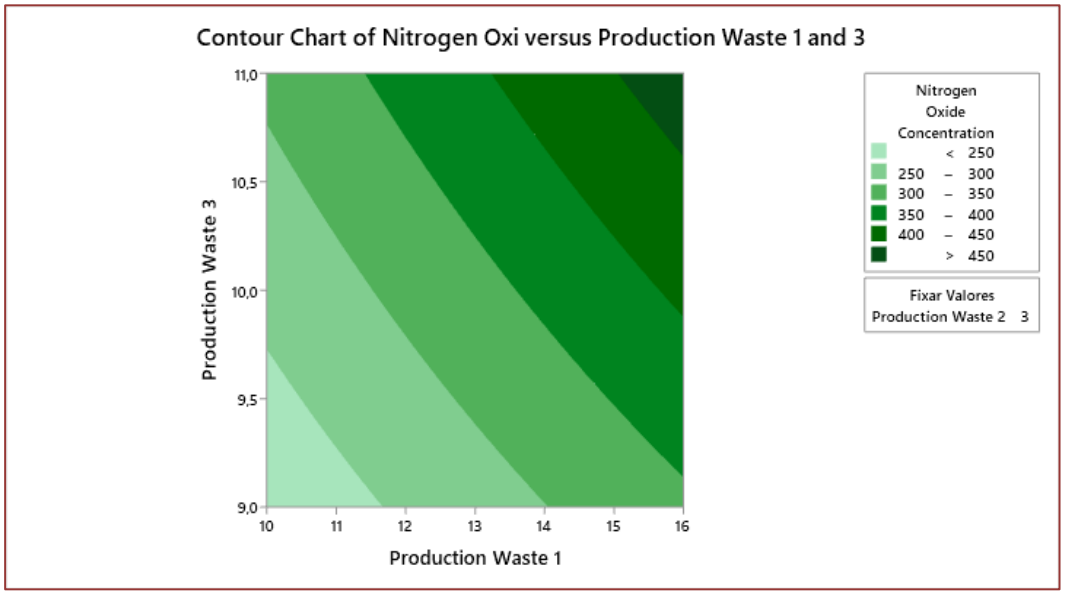
Figure 4: Main Effects Graph for Nitrogen Oxide Concentration.



Source: Authors (2025)

In the Contour Graph of Lines 1 and 3 (the most significant) seen in Figure 5, you can clearly see the ideal level values for finding the lowest values of the Response Variable. Line 1 concentration should be between 10 mg/L and 11.8 mg/L and Line 3 concentration between 9 mg/L and 9.5 mg/L.

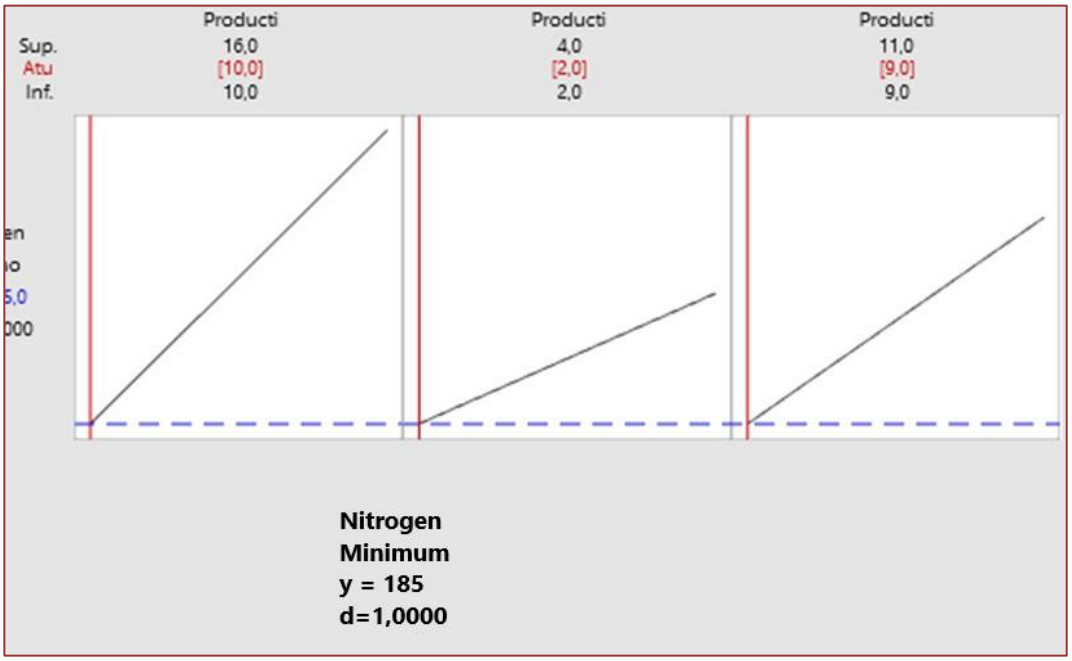
Figure 5: Contour Chart of Nitrogen Oxi versus.



Source: Authors (2025)

Finally, using the Minitab 19 Statistical Software Optimizer, we obtained the optimum values for the levels of the 3 Factors to obtain the best Response Variable. The Optimization can be seen in Figure 6.

Figure 6: Response Optimization: Nitrogen Oxide Concentration.



Source: Authors (2025)

The optimum values are 10 mg/L (Factor 1), 2 mg/L (Factor 2) and 9 mg/L (Factor 3), exactly the lowest values of the Factors.

5. FINAL CONSIDERATIONS

It can be concluded that Full Factorial Design is a very viable option for obtaining the optimum values or range of optimum values to obtain the best possible response variable in a study. In this specific case of the company, it can be concluded that Line 1 and Line 3 are the most responsible for the concentration of Nitrogen Oxide discharged into the river and therefore the n-waste should be pre-treated.

REFERENCES

[1] Abraão, R. P., Sampaio, N. A. S., Von Mühlen, C., Reis, J. S. da M., Colombari, C. V., & Dantas, C. L. R. (2024). Análise Bibliométrica da Qualidade da Água: Uma Perspectiva para a Preservação Ambiental. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, *18*(2), e05018. https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n2-096

[2] Akdur, H. T. K. (2022). Comparison of non-parametric tests of ordered alternatives for repeated measures in randomized blocks. *Communications in Statistics: Simulation and Computation*, *51*(7), 4146–4158. https://doi.org/10.1080/03610918.2020.1740262

[3] Antonio, N., Sampaio, D. S., Salvador, J., Glenio, J., C, M. D. B., D, C. P. D. C., E, F. M. G., César, L., Motta, F., & G, M. B. S. (2023). *Multiple Response Optimization: Comparative Analysis Between Models Obtained by Ordinary Least Method and Genetic Programming*. 1–23.

https://doi.org/10.26668/businessreview/2023.v8i8.3131

[4] Aranha, C. E. M., & Garcia, Vi. Á. (2020). *Produção de biodiesel a partir de óleo vegetal residual : otimização por meio de planejamento fatorial completo Produção de biodiesel a partir de óleo vegetal residual : otimização por meio de planejamento fatorial completo Versão Original*.

[5] Bertrand, J. W. M., & Fransoo, J. C. (2002). Operations management research methodologies using quantitative modeling. *International Journal of Operations and Production Management*, *22*(2), 241–264. https://doi.org/10.1108/01443570210414338

[6] Borges, E. J., Abreu, L. D. de, Prates, G. A., Brenny, G. M., Miranda Junior, J. E., & Sampaio, N. A. de S. (2024). Using the Non-Homogeneous Poisson Process (Duane's Model) to Analyze the Number of Failures in Industrial Equipment. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, *18*(5), e07922. https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n5-188

[7] Buragohain, M., & Mahanta, C. (2008). A novel approach for ANFIS modelling based on full factorial design. *Applied Soft Computing Journal*, *8*(1), 609–625. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2007.03.010

[8] Cardoso, R. P., Reis, J. S. da M., Sampaio, N. A. de S., Barros, J. G. M. de, Barbosa, L. C. F. M., & Santos, G. (2022). Sustainable Quality Management: Unfoldings, trends and perspectives from the Triple Bottom Line. *Proceedings on Engineering Sciences*, *4*(3), 359–370. https://doi.org/10.24874/PES04.03.013

[9] Carvalho, C. P. de. (2023). *ANALYSIS OF PAYMENT METHODS FOR A CANDY DISTRIBUTOR USING BI TOOLS Cleginaldo Pereira de Carvalho A Article history : Dashboard ; Google Sheets ; Currently , companies are looking for mechanisms to stand out and gain a competitive advantage in the marketp*. *January*, 1–24. https://doi.org/10.26668/businessreview/2023.v8i3.952

[10] da Motta Reis, J. S., de Souza Sampaio, N. A., de Barros, J. G. M., Cardoso, R. P., Werderits, D. E., Santos, S. G., & Barbosa, L. C. F. M. (2023). Contribution of Lean Manufacturing Concepts To Reducing Waste in Destructive Testing. *Proceedings on Engineering Sciences*, *5*(4), 627–636. https://doi.org/10.24874/PES05.04.005

[11] de Araújo, M. J. F., de Araújo, M. V. F., de Araújo, A. H., de Barros, J. G. M., de Almeida, M. da G., da Fonseca, B. B., Reis, J. S. d. M., Barbosa, L. C. F. M., Santos, G., & Sampaio,

[12] N. A. S. (2021). Pollution credit certificates theory: An analysis on the quality of solid waste management in Brazil. *Quality Innovation Prosperity*, *25*(3), 1–17. https://doi.org/10.12776/qip.v25i3.1574

[13] de Souza Sampaio, N. A., da Motta Reis, J. S., Espuny, M., Cardoso, R. P., Gomes, F. M., Pereira, F. M., Ferreira, L. C., Barbosa, M., Santos, G., & Silva, M. B. (2022). Contributions to the future of metaheuristics in the contours of scientific development. *Gestao e Producao*, *29*, 1–19. https://doi.org/10.1590/1806-9649-2022V29E099

[14] Espuny, A. L. G., Espuny, M., Costa, A. C., da Motta Reis, J. S., de Souza Sampaio, N. A., Barbosa, L. C. F. M., Santos, G., & de Oliveira, O. J. (2023). Determinants of Intent To Purchase Organic Products To Improve Quality of Life. *International Journal for Quality Research*, *17*(2), 441–454. https://doi.org/10.24874/IJQR17.02-09

[15] Gomes, F. da S., Camargo, P. R., Reis, J. S. da M., Diogo, G. M. M., Cardoso, R. P., Barros, J. G. M. de, Sampaio, N. A. de S., Barbosa, L. C. F. M., & Santos, G. (2022). The Main Benefits of Application of Six Sigma for Productive Excellence. *Quality Innovation Prosperity*, *26*(3), 151–167. https://doi.org/10.12776/qip.v26i3.1712

[16] Gomes, F. M., Ymamura, C. S., de Souza Sampaio, N. A., Pereira, F. M., Andrade, H. de S., & Silva, M. B. (2023). Optimisation of Multiple Response Processes Using Different Modelling Techniques. *Quality Innovation Prosperity*, *27*(3), 18–36. https://doi.org/10.12776/QIP.V27I3.1899

[17] Júnior, A. R., & Sampaio, N. A. de S. (2024). Monitoring a chemical manufacturing process using the attribute control chart. *Sodebras*, *19*(221). https://doi.org/10.29367/tx175t34

[18] Mazza, F. C., de Souza Sampaio, N. A., & von Mühlen, C. (2022). Hyperspeed method for analyzing organochloride pesticides in sediments using two-dimensional gas chromatography–time-of-flight mass spectrometry. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, *0123456789*. https://doi.org/10.1007/s00216-022-04464-y

[19] Mazza, F. C., Lima, A. C. da S., Sampaio, N. A. de S., De Almeida, M. da G. D., Miranda Junior, J. E., & De Abreu, L. D. (2024). Preliminary Results of Spadns Treatment by Electroflocculation With Iron Electrodes. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, *18*(1), e04784. https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n1-068

[20] Peixoto, A. L. de C., Brito, R. A. de, Fernando, R. dos S. S., Guimarães, O. L. C., & Filho, H. J. I. (2008). *Predição da emanda Química de xigênio em chorume maduro contendo reagente de fenton, or meio de modelo matemático emírico gerado com lanejamento fatorial completo*. *31*(7), 1641–1647. https://doi.org/10.1590/S0100-40422008000700008

[21] Pereira, F. M. V., & Pereira-Filho, E. R. (2018). Application of free computational program in experimental design: A tutorial. *Quimica Nova*, *41*(9), 1061–1071. https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170254

[22] Rakić, T., Kasagić-Vujanović, I., Jovanović, M., Jančić-Stojanović, B., & Ivanović, D. (2014). Comparison of Full Factorial Design, Central Composite Design, and Box-Behnken Design in Chromatographic Method Development for the Determination of Fluconazole and Its Impurities. *Analytical Letters*, *47*(8), 1334–1347. https://doi.org/10.1080/00032719.2013.867503

[23] Reis, J. S. D. M., Silva, D. E. W., Sampaio, N. A. de S., Barros, J. G. M. de, Santos, G., & Barbosa, L. C. F. M. (2024). The Benefits of FMEA in Improving The Industrial Process of a Cabin Air Carrier. *Proceedings on Engineering Sciences*, *6*(3), 1031–1040. https://doi.org/10.24874/PES06.03.016

[24] Sales, J. P. de, Reis, J. S. da M., Barros, J. G. M. de, Fonseca, B. B. da, Junior, A. H. de A., Almeida, M. da G. D. de, Barbosa, L. C. F. M., Santos, G., & Sampaio, N. A. de S. (2022). Quality Management in The Contours of Continuous Product Improvement. *International Journal for Quality Research*, *16*(3), 689–702. https://doi.org/10.24874/IJQR16.03-02

[25] Sampaio, N. A. de S., Júnior, J. E. M., Almeida, M. da G. D. de, Abreu, L. D. de, & Cardoso, R. P. (2024). Applications of Factor Analysis and Response Surface Methodology in Chemical Process Optimization Problems. *International Journal of Professional Business Revieweview*, *9*(1), 1–14. https://doi.org/10.26668/businessreview/2024.v9i1.4284

[26] Sampaio, N. A. S., Mazza, F. C., Siqueira, S. S. S. de, Miranda Junior, J. E., Moutinho, J. V. de S., & Pacífico, L. de O. (2024). Applications of Correlation Analysis in Environmental Problems. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, *18*(3), e04925. https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n3-085

[27] Severino, P., Santana, M. H. A., & Souto, E. B. (2012). Optimizing SLN and NLC by 2 2 full factorial design: Effect of homogenization technique. *Materials Science and Engineering C*, *32*(6), 1375–1379. https://doi.org/10.1016/j.msec.2012.04.017

[28] Silva, A. C. P. da, Pasini, V. D., Aguilera, M. V. C., Fonseca, B. B. da, Sampaio, N. A. de S., Reis, J. S. da M., Santos, G., & Barbosa, L. C. F. M. (2023). Mapping the Accidents and Unsafe Conditions of Workers in the Automotive Sector. *Quality Innovation Prosperity*, *27*(2), 139–157. https://doi.org/10.12776/QIP.V27I2.1849

[29] Silva, C. R. da, & Sant'Anna, A. P. (2007). Uma aplicação do planejamento de experimentos na indústria farmacêutica. *Sistemas & Gestão*, *2*(3), 274–284.

[30] Vasconcelos, T. R. de O., Savi, A. F., Prates, G. A., Brenny, G. M., Galli, L. C. do L. A., & Sampaio, N. A. de S. (2024). How to Perform a Statistical Analysis of Non-Destructive Degradation Data to Study Crack Growth in Wind Blades as a Function of the Number of Cycles. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, *18*(7), e08192. https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n7-169

[31] Volpato, N., CUNICO, M. W. M., CUNICO, M. M., MIGUEL, O. G., ZAWADZKI, S. F., & PERALTA-ZAMORA. (2008). PLANEJAMENTO FATORIAL : UMA FERRAMENTA ESTATÍSTICA VALIOSA PARA A DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS EXPERIMENTAIS EMPREGADOS NA PESQUISA CIENTÍFICA . FACTORIAL DESING : A VALUABLE STATISTIC TOOL TO DEFINE EXPERIMENTAL PARAMETERS APPLIED IN SCIENTIFIC RESEARCH Para. *Visão Acadêmica*, 23–32.

Capítulo 8

Applications of factor analysis and response surface methodology in chemical process optimization problems

Nilo Antonio de Souza Sampaio
Yúrika Wakigama Damaceno
Hugo Pimentel Tavares

Abstract: This work aims to show two applications of Design of Experiments to optimize processes in chemical industries. Among the various mathematical modeling approaches, Design of Experiments (DoE) is widely used for the for the implementation of Quality by Design (QbD) in both research and industry. In QbD, understanding the product and the process is the key factor in ensuring the quality of the end product. An assessment was made of the best method for creating mathematical models using Pareto graphs, factor graphs, contour graphs, response surface graphs and analysis of variance. In both case studies, the statistical tools proved to be suitable for analyzing the processes and were able to find the optimum process factors to guarantee the best possible response variable. Design of Experiments (DoE) is the main component of the statistical toolbox to deploy Quality by Design in both research and industrial settings.

Keywords: Experimental Design, Full Factorial Design, Response Surface Methodology.

1. INTRODUCTION

Among various mathematical modeling approaches, Design of Experiments (DoE) is extensively used for the implementation of Quality by Design QbD in both research and industrial settings. In QbD, product and process understanding is the key enabler of assuring quality in the final product. Design of Experiments (DoE) is the main component of the statistical toolbox to deploy Quality by Design in both research and industrial settings. Fisher practically highlighted the need to consider statistical analysis during the planning stages of research rather than at the final phases of experimentation. As he emphasized in his famous quote: "to consult the statistician after an experiment is finished is often merely to ask him to conduct a post mortem examination (Politis et al., 2017).

Determining a process improvement is typically complex due to variations in customer demand and technological advances. Generally, several responses must be considered in order to achieve an overall process improvement (Antonio et al., 2023). In the past decade or so, DoE has gained increasing importance in the reduction of variability in core processes, whereby consistent product quality can be achieved.

Moreover, companies striving for a six-sigma approach to achieving quality treats DOE as the key player (Antony, 2002).

Design of experiments (DoE) is one method that has proven to be very efficient in distinguishing major and minor contribution of factors on product studied. The purpose of design of experiments is to discover the critical variables, which influence the final product, their effects on variability and their respective settings. A design of experiments is the most economical and most accurate method for performing process optimization. A designed experiment will accelerate the learning of the interrelationships of the process variables, determine what variables are critical to the process and determine at what levels these variables are critical to the process (Rocak et al., 2002).

The statistically governed design of experiments (DoE) schemes used for physical experiments have been extensively used for deterministic computer experiments as well, but they are not necessarily optimal (Dersjö & Olsson, 2012).

This paper examines two applications of Design of Experiments for process optimization in the chemical industry.

2. LITERATURE REVIEW

Design of experiments (DoE) is a technique for defining which data should be collected in a given experiment. This technique is ideal for studying the effect of a set of various factors on a response variable of interest. The design of experiments carries out analyses to promote better operational performance and, consequently, a reduction in costs (Almeida E Silva & Okimoto, 2012). In order to improve industrial quality, productivity, final product performance, operating costs, among other characteristics, companies carry out various experiments to find the optimum levels of the parameters that regulate their manufacturing processes. Some of the problems encountered when carrying out tests is the need to simultaneously study the effect of factors at different levels of regulation. In this case, the number of tests required for experimentation tends to grow as the number of factors increases. This makes industrial experiments economically unviable, since the costs and time involved are high. Such problems can be circumvented when experiments are planned and analyzed using statistical methods and techniques. Among the various

types of techniques are Full Factorial Design, Fractional Factorial Design, Response Surface Methodology and Taguchi Experiments (Coleman & Montgomery, 1995; Galdamez & Carpinetti, 2004; Montgomery, 2017).

Factorial design is a useful analytical strategy and its application lies in the selection of the most relevant variables in a given analytical of a given analytical system. After this screening process of the most significant variables, experiments are carried out which allow refinement and a better understanding of the system under study. In a laboratory study, the factorial experiment can be used to analyze differences in the yields of different varieties, as well as the different levels of function of a microorganism, for example. A model in each combination at all levels of factors are applied. From this perspective, understanding and designing the statistical control of all the experimental units in a sample leads to excellence in the quality of the goods and services processes of the final product final product to be desired (Selvamuthu & Das, 2018; Vicentini et al., 2011).

Response surface methodology is a collection of statistical and mathematical techniques useful for developing, improving and optimizing processes. It also has important applications in the planning, development and formulation of new products, and improving existing designs and products. The most extensive application of RSM is in the industrial field, particularly in situations where several variables come into play that potentially influence some measure of performance or quality characteristic of a product or process. of a product or process. This measure of performance or quality characteristic is called response(Myers, R.H. and Montgomery, 1995). Response surface methodology (RSM) is a collection of statistical design and numerical optimization techniques used to optimize processes and product designs. The original work in this area dates from the 1950s and has been widely used, especially in the chemical and process industries. The last 15 years have seen the widespread application of RSM and many new developments (Myers et al., 2004). Response surface methodology is a statistical technique used for modeling and analyzing modeling and analysis of problems in which the response variable is influenced by several factors, with the aim of optimizing this response (Comparini et al., 2009).

3. RESEARCH METHOD

This work can be classified as applied research, as it aims to provide improvements in the current literature, with normative empirical objectives, aiming at the development of policies and strategies that improve the current situation (Araujo et al., 2021; H. de O. G. da Silva et al., 2021; Will M. Bertrand & Fransoo, 2002). The approach to the problem is quantitative, as is the modeling and simulation research method. The research stages were carried out following the sequence shown in Figure 1.

Figure 1 – Research method steps

Step 1: Selection of experimental data from the two case studies.	**Step 2:** Obtaining Pareto and Factor Charts to select and analyze the most important factors respectively.	**Step 3:** Analysis of Variance to interpret the data
Step 4: Interpretation and correlation between graphs and tables.	**Step 5:** Analysis of the results obtained in Steps 2,3,4,5.	**Step 6:** Conclusion writing.

Source: Authors (2026)

Case 1

The case study below is an optimization study carried out by the first author of this article for an undergraduate student at the State University of Rio de Janeiro, in Resende (RJ), where the aforementioned student carries out an internship in a Chemical Industry in the Southern Region of the State of Rio de Janeiro and works with a chemical process that uses these three factors studied, among these levels, and Table 1 shows the values that were analyzed using a Full Factorial Experiment carried out in Minitab 19 Software. The factors are not coded because, as the values are in the same order of magnitude, there is no need for this.

Table 1 – Temperature, Concentration and Catalyst Values for the Factorial Experiment

Temperature (oC)	Concentration (g/L)	Catalyst
160	20	A
180	20	A
160	40	A
180	40	A
160	20	B
180	20	B
160	40	B
180	40	B
160	20	A
180	20	A
160	40	A
180	40	A
160	20	B
180	20	B
160	40	B
180	40	B

Source: Authors (2026)

Case 2

The problem described (Silva et al., 2008) evaluates the influence of the amount of nitrogen, phosphorus and Brix levels on the yield and productivity of alcoholic fermentation. The methodology used was factorial design and response surface analysis. The aim of this study is to redo one of the analyses, more specifically the Productivity curve as a function of the amount of Nitrogen and Phosphorus to show the importance of the statistical technique used for modeling and analyzing problems in which the response variable is influenced by various factors, with the aim of optimizing this response. Table 2 shows the uncoded factorial planning matrix of the amounts of Nitrogen and Phosphorus with the response productivity of fermented alcohol, ready to be analyzed in the Minitab 19 software. This statistical technique adjusts empirical models to the experimental data obtained in relation to the experimental design and one of its advantages is that it can work with the possibility of moving in the direction of the optimum region and obtaining optimum values for each variable studied (Bezerra et al., 2008).

Table 2 – Uncoded Factorial Planning Matrix of the amounts of nitrogen and phosphorus with the Response productivity of fermented alcohol

Nitrogen (g)	Phosphorus (g)	Productivity (g L-1h-1)
0.3	0.002	5.09
0.6	0.002	5.19
0.3	0.05	6.21
0.6	0.05	6.23
0.1977	0.026	5.31
0.7023	0.026	5.09
0.45	-0.014368	5.64
0.45	0.066368	6.63
0.45	0.026	5.13
0.45	0.026	5.6
0.45	0.026	6.39
0.45	0.026	6.43
0.45	0.026	6.42

Source: Authors (2026)

4. RESULTS AND DISCUSSION

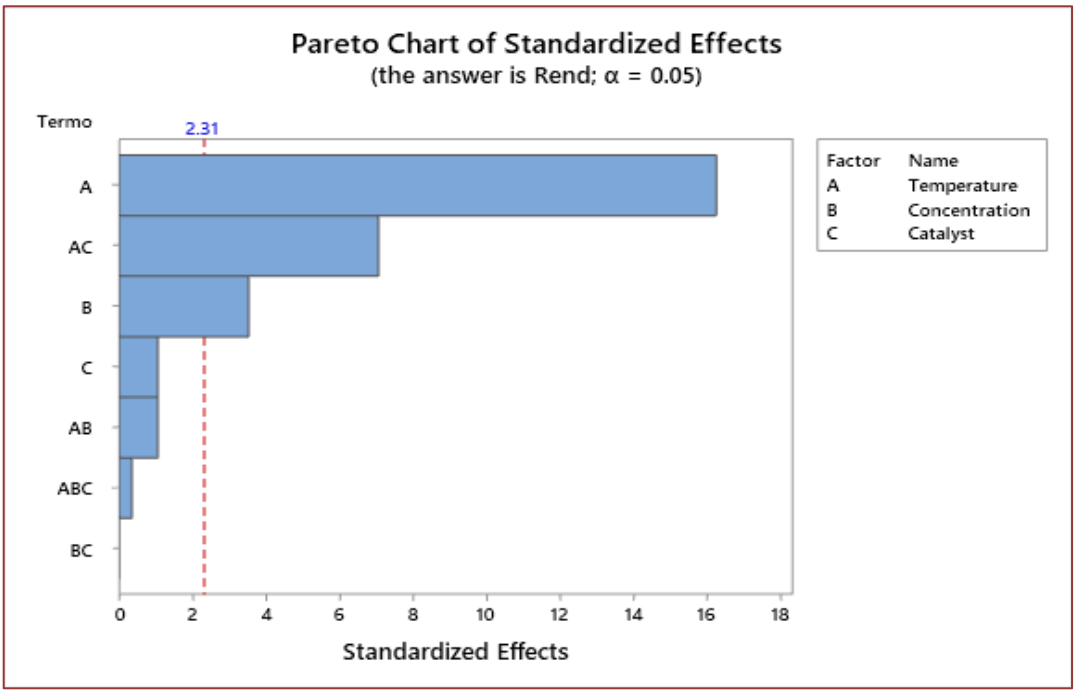
Case 1

Using factorial experimental design, the interactions of the possible parameters influencing treatment efficiency and the individual factors can be evaluated with a limited number of planned experiments, which makes the realization of the process more economically viable (Tahri Joutey et al., 2015).

The first step is to analyze which of the three factors presented, each with 2 levels (low and high), are important for obtaining the highest possible yield. To do this, we carried out a

Full Factorial Experiment with 3 factors and 2 levels with 1 replicate, where we obtained a Pareto Graph as shown in Figure-2 and an Analysis of Variance (ANOVA) as shown in Table 1, both with a 95% confidence level to show the importance of the factors. The t-critical value given by Minitab 19 software was 2.31.

Figure 2 – Pareto Chart for Standardized Effects



Source: Authors (2026)

The result clearly shows that the effects of Temperature (A), the effect of the Temperature and Catalyst Interaction (AC) and the effect of Concentration (B) are the significant ones for the Yield response variable as they were above the critical t of 2.31. This can also be seen in Table 3, which shows the Analysis of Variance where only these Factors have a p-Value of less than 0.05 (5%): Temperature (0.0), Temperature and Catalyst Interaction (0.0) and Concentration (0.08). In Factorial Planning, when one factor interacts with another, the main factor is not analyzed, so only the Interaction of Temperature with Catalyst (AC) and Concentration (B) will be analyzed, leaving Temperature (A) out because it interacts with another factor. The Adjusted R^2 reached a value of 95.5%, considered optimal, meaning that the dependent variable Yield is explained in this percentage by the significant independent variables Temperature (A), Temperature and catalyst interaction (AC) and Concentration (B).

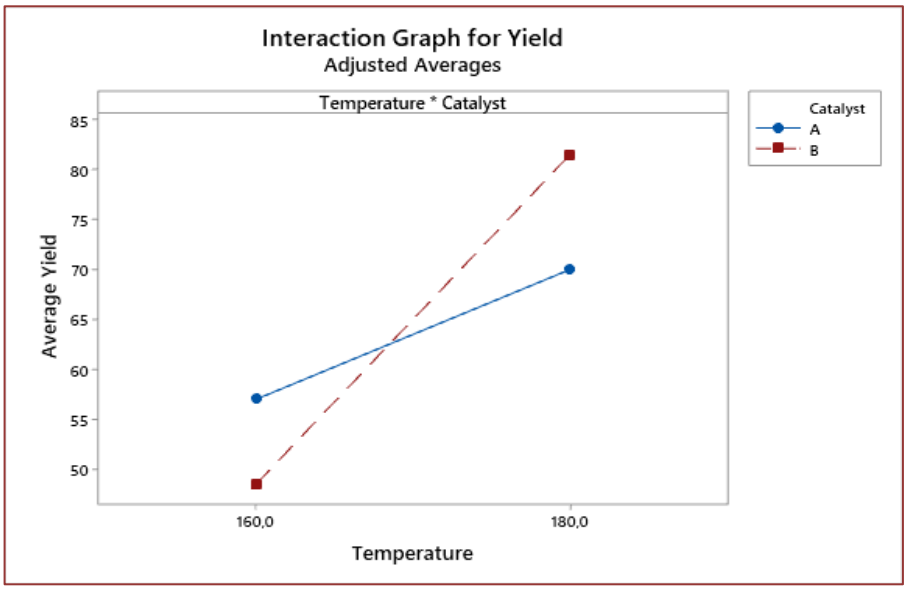
Table 3 – Analysis of Variance Table

Source	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	F Value	P-Value
Model	7	2635,00	376,43	47,05	0,000
Linear	3	2225,00	741,67	92,71	0,000
Temperature	1	2116,00	2116,00	264,50	0,000
Concentration	1	100,00	100,00	12,50	0,008
Catalyst	1	9,00	9,00	1,13	0,320
2-factor interactions	3	409,00	136,33	17,04	0,001
Temperature*Concentration	1	9,00	9,00	1,13	0,320
Temperature*Catalyst	1	400,00	400,00	50,00	0,000
Concentration*Catalyst	1	0,00	0,00	0,00	1,000
3-factor interactions	1	1,00	1,00	0,13	0,733
Temperature*Concentration*Catalyst	1	1,00	1,00	0,13	0,733
Error	8	64,00	8,00		
Total	15	2699,00			

Source: Authors (2026)

In order to evaluate the best levels for the interaction between the Temperature and Catalyst (AC) factors, a Factor Graph of the interaction between these Factors was carried out, which is shown in Figure -3. It is clear that the search is for the best possible Yield (Response Variable), which occurs at 180ºC using Catalyst B, producing a Yield of 81.5. At the lower temperature of 160oC Catalyst A is more effective while at the higher temperature of 180ºC Catalyst B is more effective. The Adjusted R^2 reached a value of 35.88%, considered average, meaning that the dependent variable Productivity is explained in this percentage by the significant independent variable Phosphorus (B). As there is only one independent variable, although the model is well adjusted, there is a loss of robustness because of this. The adjusted R-squared or modified R^2 determines the extent of the variance of the dependent variable that can be explained by the independent variable. The specialty of adjusted R^2 is that it does not take into account the impact of all the independent variables, but only those that have an impact on the variation in the dependent variable. The higher the adjusted R^2, the better the regression equation, since it implies that the independent variable chosen to determine the dependent variable can explain the variation in the dependent variable. At approximately 168ºC the two lines meet and this means that at this temperature the two catalysts produce the same yield.

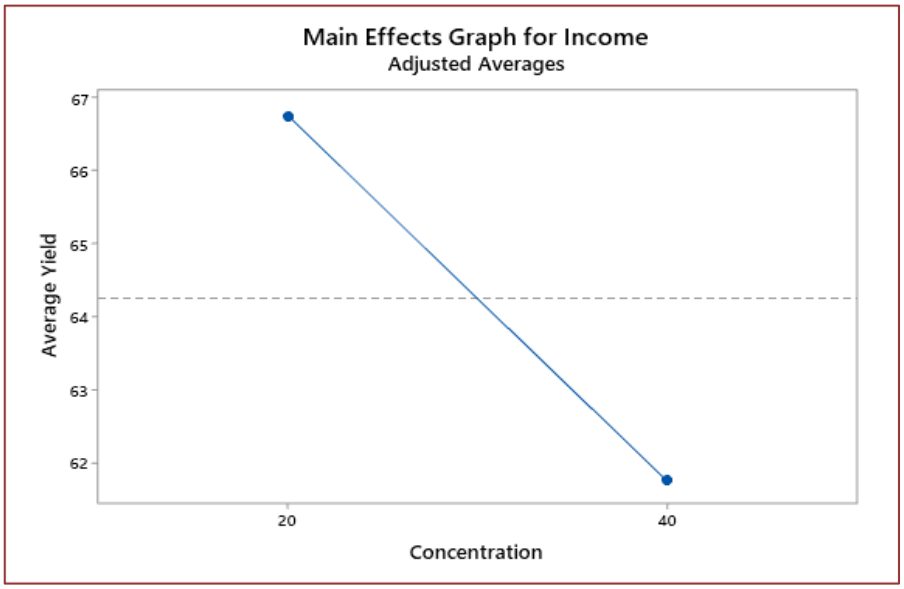
Figure 3 – Factorial Graph of the Interaction between Temperature and Catalyst



Source: Authors (2026)

Next, a factorial graph is made for the main effect Concentration (B), which appears in Figure 4. It is clear that the maximum yield occurs when the concentration is equal to 20 g/L and the minimum yield value occurs at a concentration of 40 g/L. Now we can carry out the experiment (bench) or the process (chemical reactor) by setting the factors at the correct levels to obtain the best possible yield. The graph has an important function as it clearly shows that an increase in Concentration produces a linear decrease in the response variable Yield.

Figure 4 – Factorial graph of the Main Concentration Effect

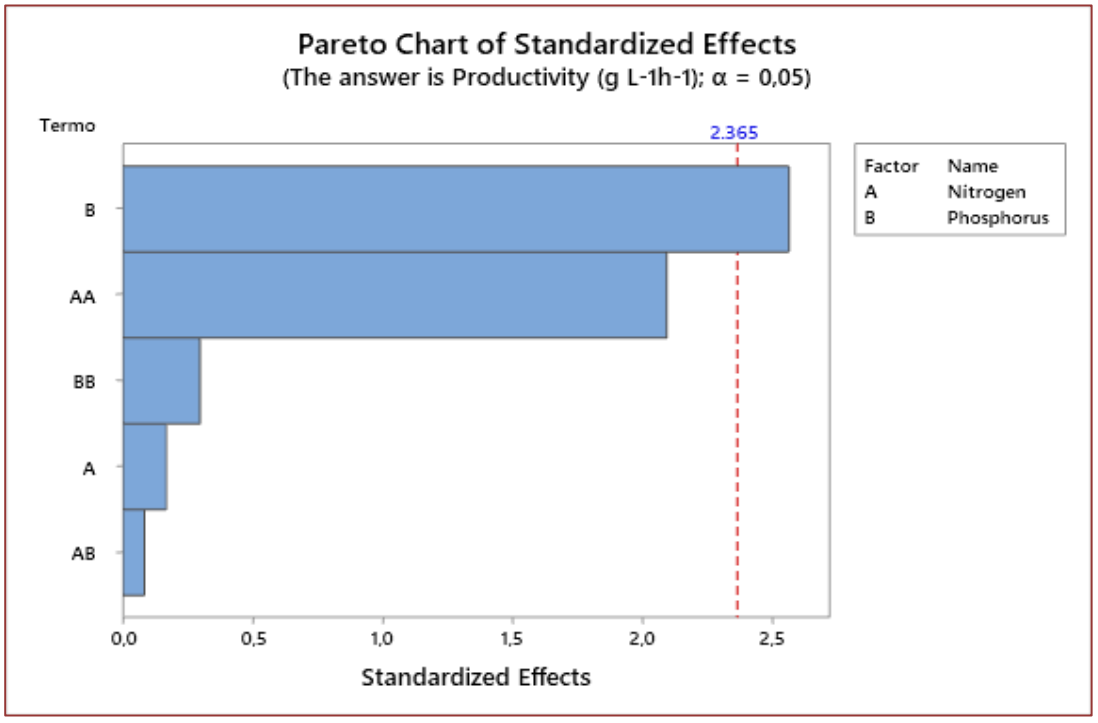


Source: Authors (2026)

Case 2

The Response Surface Methodology is the appropriate statistical technique for modeling an experiment in which we imagine that there is a curve and an optimum point, which can be the point of maximum. The first-degree polynomial model is to use a factorial experiment or a fractional factorial design. This is sufficient to determine which explanatory variables affect the response variable(s) of interest. When it is suspected that only significant explanatory variables remain, a more complicated design, such as a central composite design, can be implemented to estimate a second-degree polynomial model, which is still only an approximation at best. However, the second-degree model can be used to optimize (maximize, minimize or achieve a specific goal for) the response variable(s) of interest. (Chelladurai et al., 2020; Comparini et al., 2009).

Figure 5 – Pareto Chart for Standardized Effects



Source: Authors (2026)

The result clearly shows that the effect of Phosphorus (B) is the only significant one for the Productivity response variable, since it was higher than the critical t-value of 2.365. This can also be seen in Table 4, which shows the Analysis of Variance where only this Factor has a p-value of less than 0.05 (5%): Phosphorus (0.037).

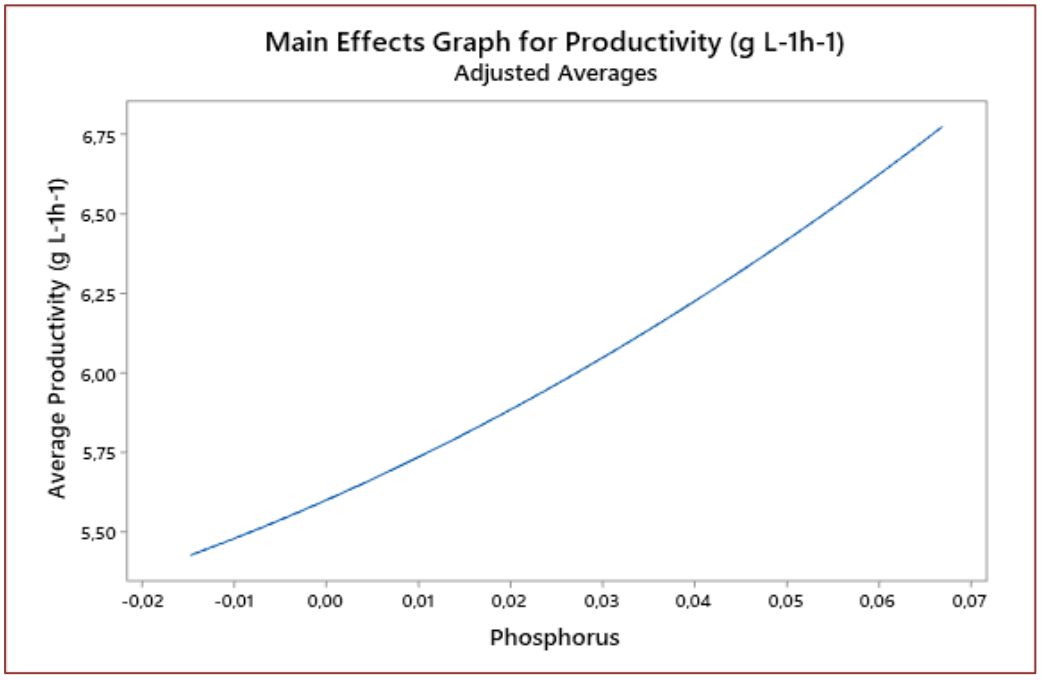
Table 4 – Analysis of Variance Table

Source	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	F Value	P-Value
Model	5	2.69551	0.53910	2.34	0.149
Linear	2	1.52145	0.76072	3.31	0.098
Nitrogen	1	0.00647	0.00647	0.03	0.872
Phosphorus	1	1.51497	1.51497	6.58	0.037
Square	2	1.17246	0.58623	2.55	0.147
Nitrogen*Nitrogen	1	1.00969	1.00969	4.39	0.074
Phosphorus*Phosphorus	1	0.02023	0.02023	0.09	0.775
Interaction with 2 Factors	1	0.00160	0.00160	0.01	0.936
Nitrogen*Phosphorus	1	0.00160	0.00160	0.01	0.936
Error	7	1.61057	0.23008		
Lack of fit	3	0.18045	0.06015	0.17	0.913
Pure error	4	1.43012	0.35753	*	*
Total	12	4.30608			

Source: Authors (2026)

As the lack of fit gave a p-value greater than 0.05 (5%), more specifically 0.913 (91.3%) the lack of fit is not significant and the model is well adjusted. Figure 6 shows the graph of the effect of Phosphorus on Productivity. It is easy to see that the higher the concentration of Phosphorus, the higher the Productivity value.

Figure 6 – Factorial graph of the effect of Phosphorus

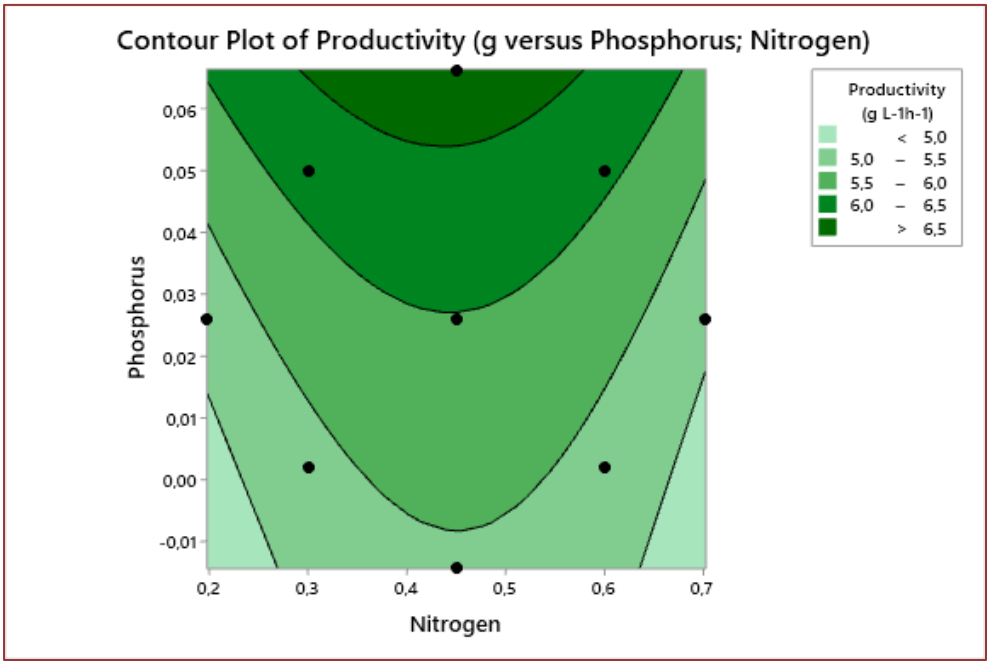


Source: Authors (2026)

This information can also be seen in Figure 7 (Contour Graph for Productivity) and Figure 8 (Surface Graph for Productivity). In the first (Contour Graph) the point of highest Productivity (around 6.5 gL-1h-1) occurs with Phosphorus above 0.06 g and the influence

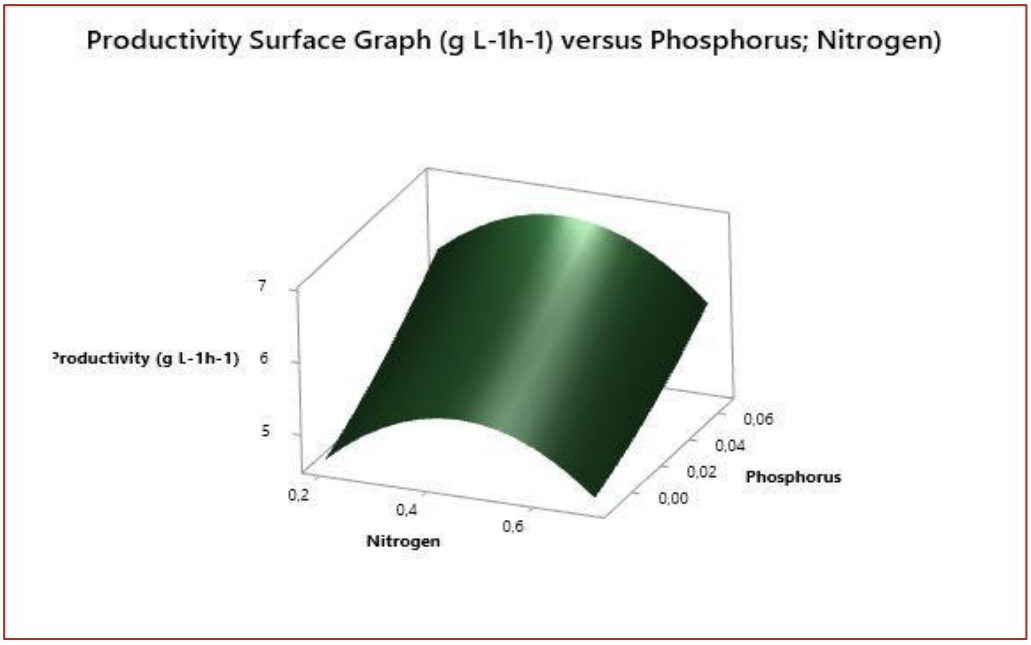
of Nitrogen is small (0.3g to 0.6 g of Nitrogen reaches the Optimum Range. In the second (Surface Graph) it is easy to see that the Nitrogen axis is at the same height and the Phosphorus axis has an increasing slope, directly proportional to the increase in Phosphorus, only confirming that it is the Significant Factor.

Figure 7 – Productivity Contour Graph



Source: Authors (2026)

Figure 8 – Productivity Surface Graph



Source: Authors (2026)

5. CONCLUSION

This work was carried out with the aim of showing the importance of Design of Experiments for applications in the chemical area. In case study 1 we used the Full Factorial methodology to study the Yield of a chemical reaction as a function of its factors and in case study 2 we used the Response Surface methodology to analyze the Productivity of an Alcoholic Fermentation Process also as a function of its factors. In both cases the Statistical Tools worked perfectly and it was possible to show who the significant factors were and the optimum range for both, so that in a laboratory or process situation it is simply a matter of choosing the optimum range of factors in order to achieve the best results for the dependent variable. A suggestion for future work is to use these tools in other case studies and define which of them is most effective in certain problem situations.

REFERENCES

[1] Almeida E Silva, C. M., & Okimoto, M. L. R. L. (2012). Design of experiment with emphasis on intuitive use. *Work*, *41*(SUPPL.1), 1100–1107. https://doi.org/10.3233/WOR-2012-0288-1100

[2] Antonio, N., Sampaio, D. S., Salvador, J., Glenio, J., C, M. D. B., D, C. P. D. C., E, F. M. G., César, L., Motta, F., & G, M. B. S. (2023). *Multiple Response Optimization: Comparative Analysis Between Models Obtained by Ordinary Least Method and Genetic Programming*. 1–23. https://doi.org/10.26668/businessreview/2023.v8i8.3131

[3] Antony, J. (2002). Training for design of experiments using a catapult. *Quality and Reliability Engineering International*, *18*(1), 29–35. https://doi.org/10.1002/qre.444

[4] Bezerra, M. A., Santelli, R. E., Oliveira, E. P., Villar, L. S., & Escaleira, L. A. (2008). Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. *Talanta*, *76*(5), 965–977. https://doi.org/10.1016/j.talanta.2008.05.019

[5] Chelladurai, S. J. S., Murugan, K., Ray, A. P., Upadhyaya, M., Narasimharaj, V., & Gnanasekaran, S. (2020). Optimization of process parameters using response surface methodology: A review. *Materials Today: Proceedings*, *37*(Part 2), 1301–1304. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.466

[6] Coleman, D. E., & Montgomery, D. C. (1995). A Systematic Approach to Planning for a Designed Industrial Experiment. *Technometrics*, *1*. https://doi.org/10.1080/00401706.1993.1 0484984

[7] Comparini, A., Passos, G., Graziadei, H., Ferreira-Silva, P. H., & Louzada, F. (2009). Metodologia De Superfície De Resposta: Uma Introdução Nos Softwares Re Statistica. *São Carlos*, *1001*, 14. http://www.icmc.usp.br/CMS/Arquivos/arquivos_enviados/BIBLIOTECA_ 113_RT_376.pdf

[8] Dersjö, T., & Olsson, M. (2012). Efficient design of experiments for structural optimization using significance screening. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, *45*(2), 185–196. https://doi.org/10.1007/s00158-011-0677-0

[9] Galdamez, E. V. C., & Carpinetti, L. C. R. (2004). Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos no processo de injeção plástica. *Gestão & Produção*, *11*(1), 121–134. https://doi.org/10.1590/s0104-530x2004000100011

[10] Montgomery, D. C. (2017). Design and Analysis of Experiments. In *Wiley* (9°). Wiley. Myers, R.H. and Montgomery, D. C. (1995). *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. John Wiley and Sons.

[11] Myers, R. H., Montgomery, D. ., Vining, G. G., M. Borror, C., & Kowalski, S. M. (2004). Response Surface Methodology: A Retrospective and Literature Survey. *Journal of Quality Technology*, *36*. https://doi.org/10.1080/00224065.2004.11980252

[12] Politis, S. N., Colombo, P., Colombo, G., & Rekkas, D. M. (2017). Design of experiments (DoE) in pharmaceutical development. *Drug Development and Industrial Pharmacy*, *43*(6), 889–901. https://doi.org/10.1080/03639045.2017.1291672

[13] Rocak, D., Kosec, M., & Degen, A. (2002). Ceramic suspension optimization using factorial design of

experiments. *Journal of the European Ceramic Society*, *22*(4), 391–395. https://doi.org/10.1016/S0955-2219(01)00309-0

[14] Selvamuthu, D., & Das, D. (2018). *Introduction to Statistical Methods, Design of Experiments and Statistical Quality Control* (Textbook (SPRINGER) (ed.)).

[15] Silva, J. A., Damasceno, B. P. G. D. L., Da Silva, F. L. H., Madruga, M. S., & De Santana, D. P. (2008). Application of the factorial design and response surface methodology for optimization of alcoholic fermentation. *Quimica Nova*, *31*(5), 1073–1077. https://doi.org/10.1590/s0100-40422008000500024

[16] Tahri Joutey, N., Bahafid, W., Sayel, H., Maâtaoui, H., Errachidi, F., & El Ghachtouli, N. (2015). Use of Experimental Factorial Design for Optimization of Hexavalent Chromium Removal by a Bacterial Consortium: Soil Microcosm Bioremediation. *Soil and Sediment Contamination*, *24*(2), 129–142. https://doi.org/10.1080/15320383.2014.922931

[17] Vicentini, F. C., Figueiredo-Filho, L. C. S., Janegitz, B. C., Santiago, A., Pereira-Filho, E. R., & Fatibello-Filho, O. (2011). Planejamento fatorial e superfície de resposta: Otimizaç ão de um método voltamétrico para a determinaçã o de Ag(I) empregando um eletrodo de pasta de nanotubos de carbono. *Quimica Nova*, *34*(5), 825–830.

Capítulo 9

Using Taguchi's experiments part III: choosing raw materials according to process yields

Nilo Antonio de Souza Sampaio
Rômulo Ivan Couto Manso
Hugo Pimentel Tavares
André Cremonez Soares Moebus

Abstract: The aim of this work is to show the application of the Taguchi Experiment in a Chemical Industry Process. A Taguchi design, or orthogonal array, is a method for designing experiments that usually require only a fraction of the complete factorial combinations. The orthogonal array means that the design is balanced, so that the factor levels are weighted equally. Therefore, each factor can be evaluated independently of all the other factors, so that the effect of one factor does not influence the estimate of another factor: Static experiments (without a sign factor) and dynamic experiments (with a sign factor). Experimental data was taken from a Chemical Industry in the South of the State of Rio de Janeiro and the data was treated with the Taguchi Experiment. It can be concluded that the Taguchi experiment is a very viable option for optimizing the performance of industrial processes. In this specific case of the factory, it can be concluded that the most significant factors in order of importance are Factors A, B and C. The use cases of the Taguchi experiment are multiplying in the scientific literature and have proven to be highly effective in dealing with data where the assumptions of Normality are confirmed. Despite being well-known statistical tools, the Taguchi Experiment is widely used and can bring innovations in its application, as in the case of the company in question.

Keywords: Taguchi Experiment, Chemical Industry, Factors, Levels.

1. INTRODUCTION

During the last century, statistics revolutionized science by presenting useful models that modernized the research process in the direction of better research parameters, making it possible toguide decision making in a wide variety of areas. Statistical methods were developed as a mixture of science and logic for the solution and investigation of problems in various areas of human knowledge (Abraão et al., 2024; Akdur, 2022; Antonio et al., 2023; Borges et al., 2024; de Araújo et al., 2021; Mazza et al., 2022, 2024; N. A. S. Sampaio, Mazza, Siqueira, et al., 2024; Nilo Antonio de Souza Sampaio et al., 2024; Silva et al., 2023)

The launch of a new product and/or process usually involves working with a large number of variables. Conscientious planning of the experiments that must be used to manipulate these variables and arrive at the desired answers is indispensable if reliable results are to be obtained and if consistent statistical analyses are to be carried out. In this context, it is no longer possible to develop products and processes empirically as was done in the past. The strong competition, the diffusion of technological processes and the responsibility of the scientific community now make such procedures impossible. The optimization of processes and products requires more than ever a robust statistical study (Cardoso et al., 2022; Carvalho, 2023; da Motta Reis et al., 2023; De Almeida et al., 2020; Espuny et al., 2023; F. da S. Gomes et al., 2022; F. M. Gomes et al., 2023; Junior et al., 2023; Roberto Campos Leoni et al., 2017; Reis et al., 2024; Sales et al., 2022; N. A. S. Sampaio, Mazza, Siqueira, et al., 2024; Nilo Antônio de Souza Sampaio, Carvalho, et al., 2025; Vasconcelos et al., 2024).

Genichi Taguchi was an engineer and statistician. From the 1950s onwards, he developed a methodology that used the application of statistical methods to improve the quality of manufactured products. The main objective of the Method is to improve the characteristics of the process or of a product by identifying and adjusting its controllable factors, which will minimize the variation of the final product, about its objective. By adjusting the factors to their optimal level, the products can be manufactured in a way that they become more robust to any changes that may occur and that are uncontrollable (environmental conditions, temperature variation, packaging times, etc (Moura et al., 2023).The aim of this study is to accurately analyze water quality at strategic monitoring points over a decade through the combined use of statistical methods.

The aim of this article is to present the results obtained with the Taguchi Experiment for a case study in a Chemical Industry in the southern region of the state of Rio de Janeiro, Brazil.

2. THEORETICAL BACKGROUND

Conventional statistical tests are usually called parametric tests. Parametric tests are used more frequently than nonparametric tests in many medical articles, because most of the medical researchers are familiar with and the statistical software packages strongly support parametric tests. Parametric tests require important assumption; assumption of normality which means that distribution of sample means is normally distributed. However, parametric test can be misleading when this assumption is not satisfied (Nilo Antônio de Souza Sampaio et al., 2025).

Design of experiments are techniques used to improve a process through experiments that indicate the effect of factors on the procedure, such as temperature, concentration of components, manufacturing speed, purity of a material, etc. It is a method of observing the results in order to act on the process, although at a certain point it is possible to include technical and scientific studies in order to help assess the influence of a factor. Among the various types of experimental planning, factorial systems stand out because they allow the effect of a large number of variables to be evaluated simultaneously number of variables, from a reduced number of experimental trials, when compared to univariate processes (Antônio et al., 2025; Mahapatra & Patnaik, 2009).

The Taguchi experiment identifies and evaluates the variables that affect a product or process, carries out controlled experiments to determine the optimum configurations of these variables, minimizes the sensitivity of performance to variations, and makes products and processes more robust and consistent. The Taguchi experiment considers two types of factors.

- Control factors, which are process or experiment parameters that can be controlled.
- Noise factors, which are process or experimental parameters that are difficult or expensive to control.

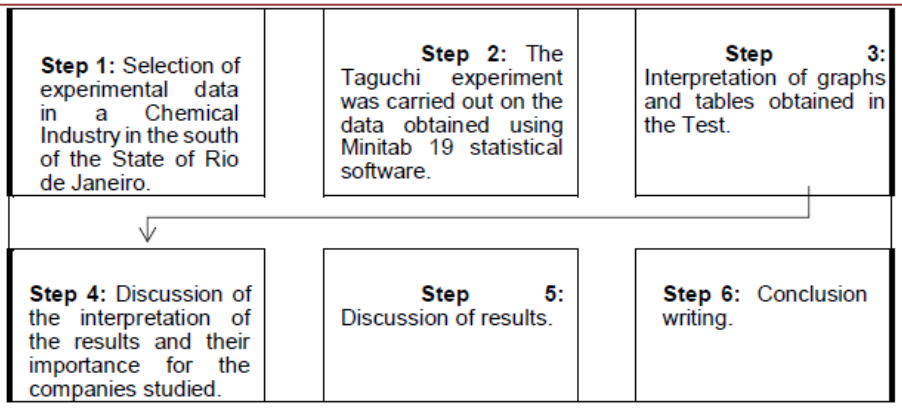
These are the main concepts of the Taguchi Experiments (Jeyapaul et al., 2005).

The fundamental idea of Taguchi planning focuses on reducing the variance of a product's quality function both in the laboratory and later in the field. This is not the case in the classical design theory of experiments. Here, the variance of the quality characteristic is assumed to remain constant for all levels of the model factors. This ignores the problem of variability reduction, which is a critical issue when it comes to quality improvement (Narayana & Venkatesh, 2019). The Taguchi experiment has been used in various fields, such as Telecommunications, Software, Electronics, Xerography, Automobiles, Other engineering fields (Reis et al., 2024).

3. MATERIALS AND METHODS

This work can be classified as applied research, as it aims to provide improvements in the current literature, with normative empirical objectives, aiming at the development of policies and strategies that improve the current situation (Bertrand & Fransoo, 2002; de Araújo et al., 2021). The approach to the problem is quantitative, as is the modeling and simulation research method. The research stages were carried out following the sequence shown in Figure 1.

Figure 1: *Research method steps*



Source: Authors (2025).

The paper presents a case study carried out in a Chemical Industry in the Sul Fluminense region, in the state of Rio de Janeiro. Three specific types of Raw Materials (A, B and C) are required for production to take place normally and each of them has 3 Levels which are the Concentrations in (mol/L). They are shown in Table 1.

Table 1: Three Factors used in this study, each with 3 Levels:

A	B	C
200	100	150
250	125	180
300	150	195

How each Factor and each Level leads to an output of the Finished Product in Tons. A Taguchi L9 was carried out to understand which Factor and at which Level leads to Greater Production.

4. RESULTS AND DISCUSSION

Table 2 below shows Taguchi's L9 with each of the Factors at their different Levels and the Response Variable Yields in Tons.

A	B	C	Distance
200	100	150	2.5
200	125	180	2.85
200	150	195	3
250	100	180	3.2
250	125	195	3.7
250	150	150	3.9
300	100	195	2.5
300	125	150	2.6
300	150	180	2.57

Source: Authors (2025)

Table 3 shows the same Taguchi L9 experiment, only coded. Coding helps a lot in the experiment

when there are marked differences between the order of magnitude of the factors.

Table 3: Coded Taguchi L9 Experiment with Three Factors and the Response Variable Yield in Tons.

A	B	C	Yield in Ton of Product Produced
1	1	1	2.5
1	2	2	2.85
1	3	3	3
2	1	2	3.2
2	2	3	3.7
2	3	1	3.9
3	1	3	2.5
3	2	1	2.6
3	3	2	2.57

Source: Authors (2025)

Table 4, which is the Response Table for Signal-to-Noise Ratios, taking into account the "Bigger is Better" analysis, shows that Factor A is the most significant for the Response Variable, followed by Factor B and then C, as can be seen from the following Ranks.

Table 4: Response Table for Signal-to-Noise Ratios Higher is better

Level	A	B	C
1	8,866	8,674	9,360
2	11,096	9,587	9,133
3	8,152	9,854	9,622
Delta	2,944	1,181	0,489
Rank	1	2	3

Source: Authors (2025)

The Response Table for Averages seen in Figure-5 shows exactly the same situation, with Variable A being significant first, then B and finally C.

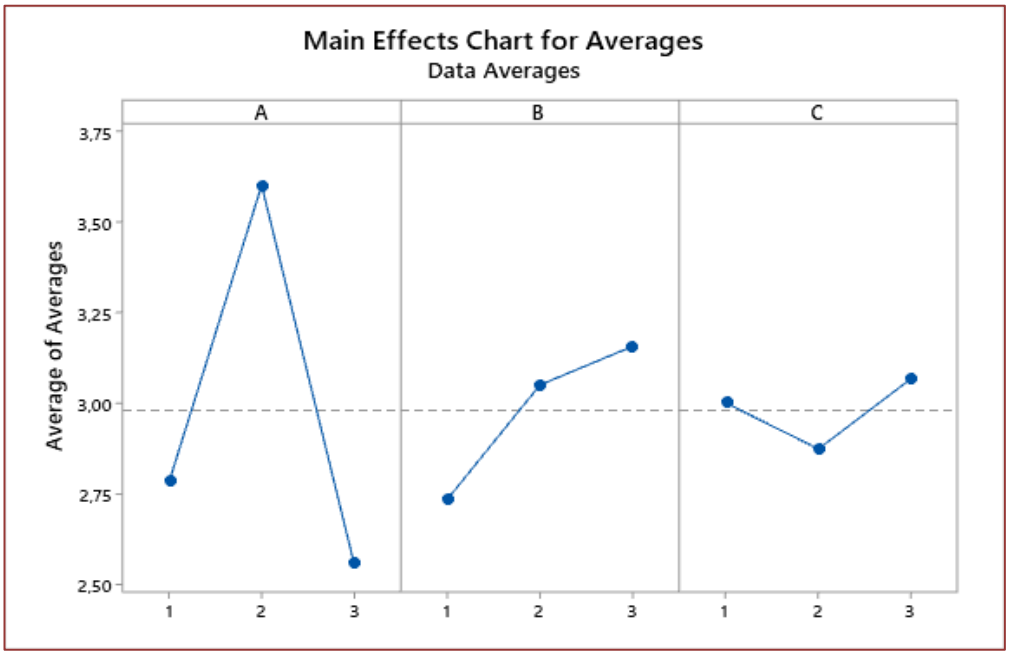
Table 5: Response Table for Averages

Level	A	B	C
1	2,783	2,733	3,000
2	3,600	3,050	2,873
3	2,557	3,157	3,067
Delta	1,043	0,423	0,193
Posto	1	2	3

Source: Authors (2025)

The Effects for Averages graph seen in Figure-2 shows that Factor A gives the best Response Variable at Level 2, Factor B at Level 3 and Factor C at Level 3 as well.

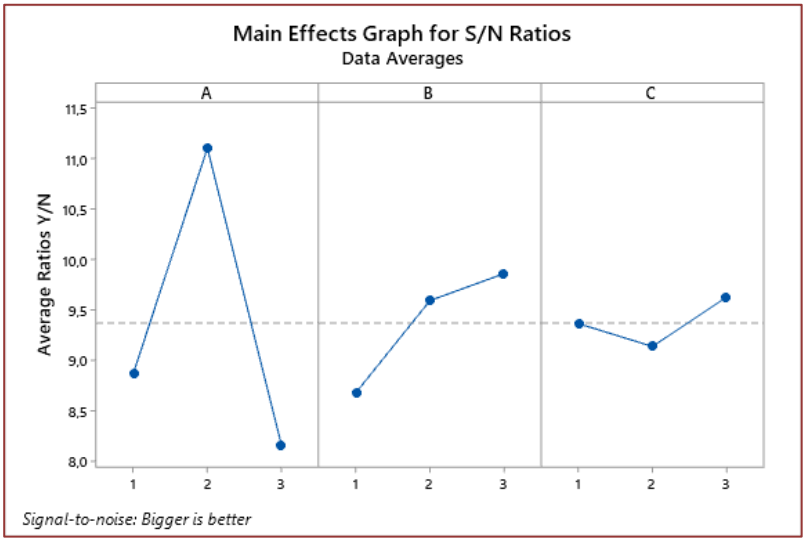
Figure 2 *Chart of Effects for Averages*



Source: Authors (2025).

Similarly, the Effects Graph for the Signal to Noise Ratio seen in Figure-3 shows exactly the same result with Factor A gives the best Response Variable at Level 2, Factor B at Level 3 and Factor C at Level 3 as well.

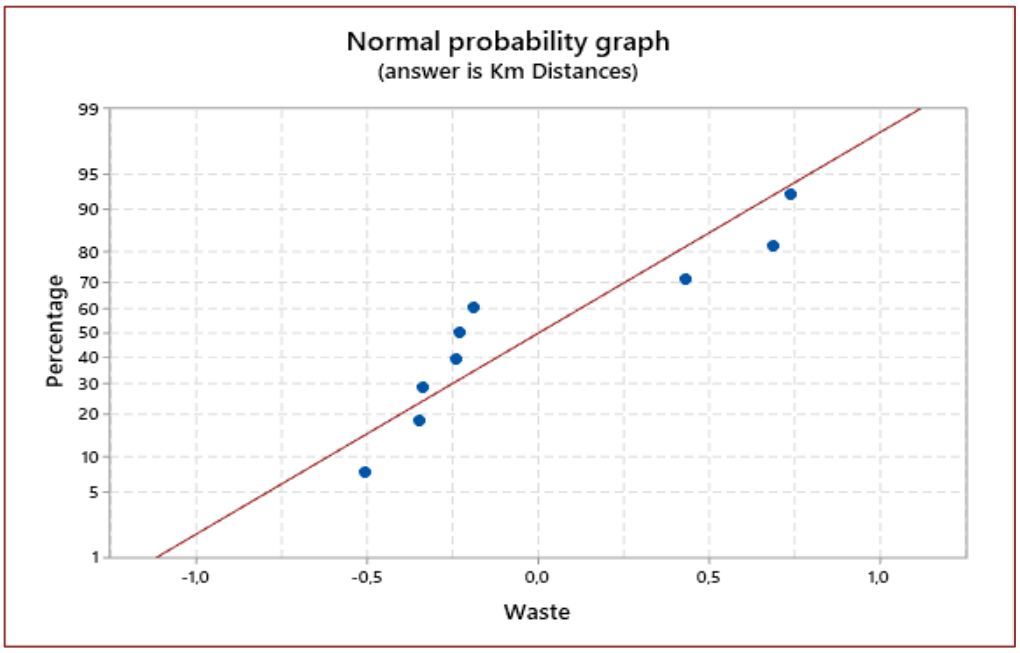
Figure 3: Graph of Effects for Signal to Noise Ratio



Source: Authors (2025).

To ensure that the data was normalized and that the Taguchi Experiments could be used, the Normal Probability Graph shown in Figure-4 was performed, which showed that the data was perfectly normalized.

Figure 4: Normal Probability Graph



Source: Authors (2025).

In order to make future predictions for the Yield Response Variable, we also generated the Regression Equation as a function of Factors A, B and C shown in Equation (1).

Yield in tons = 2,717 - 0,113 A + 0,212 B + 0,033 C

5. FINAL CONSIDERATIONS

It can be concluded that the Taguchi experiment is a very viable option for optimizing the yield of industrial processes. In this specific case of the plant, it can be concluded that the most significant Factors in order of importance are Factors A, B and C, and also that Factor A presents the best Response Variable at Level 2 and Factors B and C at Level 3.

REFERENCIAS

[1] Abraão, R. P., Sampaio, N. A. S., Von Mühlen, C., Reis, J. S. da M., Colombari, C. V., & Dantas, C. L. R. (2024). Análise Bibliométrica da Qualidade da Água: Uma Perspectiva para a Preservação Ambiental. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, *18*(2), e05018. https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n2-096

[2] Akdur, H. T. K. (2022). Comparison of non-parametric tests of ordered alternatives for repeated measures in randomized blocks. *Communications in Statistics: Simulation and Computation*, *51*(7), 4146–4158. https://doi.org/10.1080/03610918.2020.1740262

[3] Antonio, N., Sampaio, D. S., Salvador, J., Glenio, J., C, M. D. B., D, C. P. D. C., E, F. M. G., César, L., Motta, F., & G, M. B. S. (2023). *Multiple Response Optimization: Comparative Analysis Between Models Obtained by Ordinary Least Method and Genetic Programming*. 1–23.

https://doi.org/10.26668/businessreview/2023.v8i8.3131

[4] Antônio, N., Sampaio, D. S., Sérgio, S., Siqueira, S. De, Diniz, G., Mazza, F. C., Ercio, J., Junior, M., Kawakani, M. L., & Isaac, G. (2025). *APPLICATIONOF FULL FACTORIAL PLANNING TO CONTROL NITROGEN IN A WATER RESOURCE*. 1–13. https://doi.org/10.24857/rgsa.v19n1-128

[5] Bertrand, J. W. M., & Fransoo, J. C. (2002). Operations management research methodologies using quantitative modeling. *International Journal of Operations and Production Management*, *22*(2), 241–264. https://doi.org/10.1108/01443570210414338

[6] Borges, E. J., Abreu, L. D. de, Prates, G. A., Brenny, G. M., Miranda Junior, J. E., & Sampaio, N. A. de S. (2024). Using the Non-Homogeneous Poisson Process (Duane's Model) to Analyze the Number of Failures in Industrial Equipment. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, *18*(5), e07922. https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n5-188

[7] Cardoso, R. P., Reis, J. S. da M., Sampaio, N. A. de S., Barros, J. G. M. de, Barbosa, L. C. F. M., & Santos, G. (2022). Sustainable Quality Management: Unfoldings, trends and perspectives from the Triple Bottom Line. *Proceedings on Engineering Sciences*, *4*(3), 359–370. https://doi.org/10.24874/PES04.03.013

[8] Carvalho, C. P. de. (2023). *ANALYSIS OF PAYMENT METHODS FOR A CANDY DISTRIBUTOR USING BI TOOLS Cleginaldo Pereira de Carvalho A Article history : Dashboard ; Google Sheets ; Currently , companies are looking for mechanisms to stand out and gain a competitive advantage in the marketp*. *January*, 1–24. https://doi.org/10.26668/businessreview/2023.v8i3.952

[9] da Motta Reis, J. S., de Souza Sampaio, N. A., de Barros, J. G. M., Cardoso, R. P., Werderits, D. E., Santos, S. G., & Barbosa, L. C. F. M. (2023). Contribution of Lean Manufacturing Concepts To Reducing Waste in Destructive Testing. *Proceedings on Engineering Sciences*, *5*(4), 627–636. https://doi.org/10.24874/PES05.04.005

[10] de Araújo, M. J. F., de Araújo, M. V. F., de Araújo, A. H., de Barros, J. G. M., de Almeida, M. da G., da Fonseca, B. B., Reis, J. S. d. M., Barbosa, L. C. F. M., Santos, G., & Sampaio,

[11] N. A. S. (2021). Pollution credit certificates theory: An analysis on the quality of solid waste management in Brazil. *Quality Innovation Prosperity*, *25*(3), 1–17. https://doi.org/10.12776/qip.v25i3.1574

[12] Espuny, A. L. G., Espuny, M., Costa, A. C., da Motta Reis, J. S., de Souza Sampaio, N. A., Barbosa, L. C. F. M., Santos, G., & de Oliveira, O. J. (2023). Determinants of Intent To Purchase Organic Products To Improve Quality of Life. *International Journal for Quality Research*, *17*(2), 441–454. https://doi.org/10.24874/IJQR17.02-09

[13] Gomes, F. da S., Camargo, P. R., Reis, J. S. da M., Diogo, G. M. M., Cardoso, R. P., Barros, J. G. M. de, Sampaio, N. A. de S., Barbosa, L. C. F. M., & Santos, G. (2022). The Main Benefits of Application of Six Sigma for Productive Excellence. *Quality Innovation Prosperity*, *26*(3), 151–167. https://doi.org/10.12776/qip.v26i3.1712

[14] Gomes, F. M., Ymamura, C. S., de Souza Sampaio, N. A., Pereira, F. M., Andrade, H. de S., & Silva, M. B. (2023). Optimisation of Multiple Response Processes Using Different Modelling Techniques. *Quality Innovation Prosperity*, *27*(3), 18–36. https://doi.org/10.12776/QIP.V27I3.1899

[15] Jeyapaul, R., Shahabudeen, P., & Krishnaiah, K. (2005). Quality management research by considering multi-response problems in the Taguchi method - A review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *26*(11–12), 1331–1337. https://doi.org/10.1007/s00170-004-2102-y

[16] Junior, A. M. da C., Barros, J. G. M. de, Almeida, M. da G. D. de, Carvalho, C. P. de, & Sampaio, N. A. de S. (2023). *Application of the poisson distribution in the prediction of the number of defects in a textile factory Aplicação da distribuição de poisson na predição do número de defeitos em uma fábrica têxtil*. *14*(8), 14378–14386. https://doi.org/10.7769/gesec.v14i8.2671

[17] Mahapatra, S. S., & Patnaik, A. (2009). Study on mechanical and erosion wear behavior of hybrid composites using Taguchi experimental design. *Materials and Design*, *30*(8), 2791–2801. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.01.037

[18] Mazza, F. C., de Souza Sampaio, N. A., & von Mühlen, C. (2022). Hyperspeed method for analyzing organochloride pesticides in sediments using two-dimensional gas chromatography–time-of-flight mass spectrometry. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, *0123456789*. https://doi.org/10.1007/s00216-022-04464-y

[19] Mazza, F. C., Lima, A. C. da S., Sampaio, N. A. de S., De Almeida, M. da G. D., Miranda Junior, J. E., & De Abreu, L. D. (2024). Preliminary Results of Spadns Treatment by Electroflocculation With Iron Electrodes. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, *18*(1), e04784. https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n1-068

[20] Moura, R. Q. De, Rodrigues, I. A. M., & Sampaio, N. A. de S. (2023). Using Taguchi ' s experiments part i : creating a golf ball that reaches a maximum range Usando os experimentos de Taguchi parte i : criando uma bola de golfe que atinja um alcance máximo. *Revista de Gestão e Secretariado*, *14*(7), 11748–11757. https://doi.org/10.7769/gesec.v14i7.2502

[21] Narayana, S., & Venkatesh, B. (2019). Experimental investigation and optimization of the fused deposition modelled acrylonitrile butadiene styrene. *AIP Conference Proceedings*, *2200*(December). https://doi.org/10.1063/1.5141225

[22] Reis, J. S. D. M., Silva, D. E. W., Sampaio, N. A. de S., Barros, J. G. M. de, Santos, G., & Barbosa, L. C. F. M. (2024). The Benefits of FMEA in Improving The Industrial Process of a Cabin Air Carrier. *Proceedings on Engineering Sciences*, *6*(3), 1031–1040. https://doi.org/10.24874/PES06.03.016

[23] Sales, J. P. de, Reis, J. S. da M., Barros, J. G. M. de, Fonseca, B. B. da, Junior, A. H. de A., Almeida, M. da G. D. de, Barbosa, L. C. F. M., Santos, G., & Sampaio, N. A. de S. (2022). Quality Management in The Contours of Continuous Product Improvement. *International Journal for Quality Research*, *16*(3), 689–702. https://doi.org/10.24874/IJQR16.03-02

[24] Sampaio, N. A. S., Mazza, F. C., Siqueira, S. S. S. de, Miranda Junior, J. E., Moutinho, J. V. de S., & Pacífico, L. de O. (2024). Applications of Correlation Analysis in Environmental Problems. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, *18*(3), e04925. https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n3-085

[25] Sampaio, Nilo Antônio de Souza, Carvalho, E., Almeida, M. da G. D. de, Barros, J. G. M. de, Junior, J. E. M., Paula, E. R. M. de, & Prata, D. S. (2025). APPLYING THE MOOD MEDIAN TEST TO AN ENVIRONMENTAL PROBLEM. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, *19*(2). https://doi.org/10.24857/rgsa.v19n2-046

[26] Sampaio, Nilo Antonio de Souza, Júnior, J. E. M., Almeida, M. da G. D. de, Abreu, L. D. de, & Cardoso, R. P. (2024). Applications of Factor Analysis and Response Surface Methodology in Chemical Process Optimization Problems. *International Journal of Professional Business Revieweview*, *9*(1), 1–14. https://doi.org/10.26668/businessreview/2024.v9i1.4284

[27] Silva, A. C. P. da, Pasini, V. D., Aguilera, M. V. C., Fonseca, B. B. da, Sampaio, N. A. de S., Reis, J. S. da M., Santos, G., & Barbosa, L. C. F. M. (2023). Mapping the Accidents and Unsafe Conditions of Workers in the Automotive Sector. *Quality Innovation Prosperity*, *27*(2), 139–157. https://doi.org/10.12776/QIP.V27I2.1849

[28] Vasconcelos, T. R. de O., Savi, A. F., Prates, G. A., Brenny, G. M., Galli, L. C. do L. A., & Sampaio, N. A. de S. (2024). How to Perform a Statistical Analysis of Non-Destructive Degradation Data to Study Crack Growth in Wind Blades as a Function of the Number of Cycles. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, *18*(7), e08192. https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n7-169

Capítulo 10

Using the paired T-Test to compare suppliers in a company

Nilo Antonio de Souza Sampaio
Luana Ellen da Silva Santos
Hugo Pimentel Tavares

Abstract: The manufacture of industrial products requires rigorous quality, which is why they need to be in compliance. It is therefore essential that two different suppliers present products within the same specifications. The aim of this article is to show a case study carried out in a company in the south of the state of Rio de Janeiro, which used the Paired T Test to compare two types of foam for hospital mattresses. The results showed that supplier 1 produces a foam below the specified thickness of 11 cm while supplier 2 produces a foam within the specified value, so supplier 1 would be rejected and supplier 2's service would be used.

.

Keywords: Statistical Software. Industrial Process. Paired T Test. Specifications.

1. INTRODUCTION

With the passage of time, logistics planning has become fundamental for companies to remain in the market in which they operate, whether they are small, medium or large. This planning seeks to avoid failure in the face of strong competition. Organizations are groups of people who come together to achieve the same goals. to achieve the same objectives. The people who make them up make and carry out a set of tasks in which logistics helps to understand and organize certain companies and organization of certain companies. In the logistics process, it is important to maintain partnerships with suppliers, a good relationship, since this interaction is essential to avoid delays in receiving supplies. to avoid delays in receiving materials, which could jeopardize customer service. customer service. In addition, companies must be attentive to the interaction their sectors so that they don't remain isolated, but relate to each other in an integrated way, facilitating the logistics process (Lima et al., 1980)

In the mattress manufacturing sector, for example, Reverse Logistics is still a practice that is not used. In this way, actions aimed at studying and applying Reverse Logistics in the mattress sector are still incipient. In the mattress sector is still incipient, even in an increasingly evident scenario of demands for waste reduction through more effective investment of waste reduction through more effective investment on the part of waste generators and greater awareness on the part of society as a whole (Conceição & Pacheco, 2008).

The paired t-test is useful for analyzing the same set of items that have been measured under two different conditions, the differences in measurements made on the same subject before and after a treatment, or differences between two treatments given to the same subject. This type of test is used when there is a before and after study on the same individual, a twin study, the same element of a sample is measured over time or evaluated before or after the application of a certain treatment or is evaluated using different methods. Therefore, on these occasions, it is possible to assess whether the mean difference between the observations is statistically equal to zero or not. This is done using the t-test for paired data or dependent samples. Thus, the hypotheses evaluated can be:

$$\text{Ho: } u1 = u2$$

$$\text{Ha: } u1 \neq u2$$

If the calculated T value is greater than the tabulated T value, Ho is rejected, i.e. there is a difference between the two samples (Montgomery, 2009, 2017).

In view of the above, the research question that guided this work is: to visualize a practical application of the paired T-Test in the area of Logistics. The aim of this paper is to show this application, but specifically to show the application of the T-Test in the area of comparing two manufacturers of hospital bed foam. Initially, the article will cover the concepts of Logistics and the Paired T-Test. Then the results and discussions of the proposed objective will be presented. Finally, the conclusion will be presented with suggestions for future studies.

2. THEORETICAL BACKGROUND

Launching a new product usually involves working with a large number of variables. Conscientious planning of the experiments that must be used to manipulate these variables and arrive at the desired answers is indispensable for obtaining reliable results and carrying out consistent statistical analyses. In this context, it is not possible to develop products and processes through trial and error procedures. Fierce competition, the spread of technological processes and the responsibility of the scientific community now make these procedures unfeasible. Optimizing processes and products requires more than ever a robust statistical study (Costa, 2011; Sales et al., 2021).

Determining a process improvement is often complex due to variations in customer demand and technological advances. The use of pesticides in agriculture has grown considerably in recent decades, along with pressure for increased food productivity growth.

Taking into account that the improvement of the quality of a company needs to take into account the environmental issue, the treatment of effluents needs to be a key issue for a company (Cardoso, R.P ;Sampaio, N.A.S;Reis, J.S.M;Silva, D.E.W;Barros, 2023; Cardoso et al., 2023a; Espuny et al., 2022; Gomes et al., 2022; Felipe C. Mazza et al., 2023; Felipe Cury Mazza et al., 2022; Reis, Neto, et al., 2023; Santana et al., 2023; Yamada et al., 2023).

The history of industry is marked by revolutions, the Fourth Industrial Revolution offers opportunities for sustainability and means to reduce environmental degradation and social inclusion with decisions made based on scientific information. Currently, statistics has contributed significantly to the decision-making process because much of what is produced is based on quantitative methods, and statistics is one of these areas (Caixeta-Neta et al., 2020; Fonseca, D;Correa, M.P.O;Santos, R.R;Cardoso, R.P;Reis, J.S.M;Sampaio, 2023; Felipe Cury Mazza et al., 2022; Montgomery, 2017; Reis, Cardoso, et al., 2023).

Quality is a challenge and needs to be implemented if industrial processes are to be sustainable and have a real impact on reducing and eliminating environmental problems. Statistics is an essential tool and has been used in various applications and in all areas of human knowledge to improve processes, such as decision making and to guarantee the preservation of the environment (Cardoso, R.P ;Sampaio, N.A.S;Reis, J.S.M;Silva, D.E.W;Barros, 2023; Cardoso et al., 2023b; da Silva et al., 2021; Espuny et al., 2022; Fonseca, D;Correa, M.P.O;Santos, R.R;Cardoso, R.P;Reis, J.S.M;Sampaio, 2023; Gomes et al., 2022; Leiroz et al., 2023; Felipe Cury Mazza et al., 2022; Moura et al., 2023; Reis et al., 2022; Rezende et al., 2023; Rubert et al., 2023; Sampaio et al., 2022; Yamada et al., 2023)

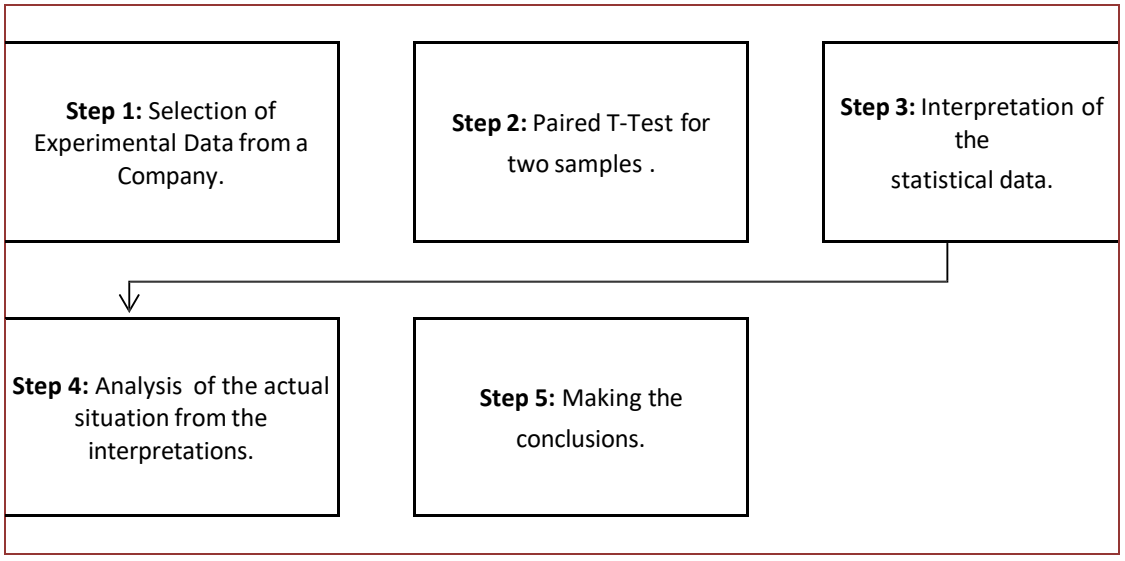
The paired T-test is used in different industrial applications and in medical research applications that work with comparisons of two paired samples (Segman & Sheiman, 2018). The Paired T-Test is evaluated using a p-value greater than the acceptable level of uncertainty (e.g. $\alpha = 0.05$) under the specified degrees of freedom, there are no specified degrees of freedom, there are no significant differences between the paired data Otherwise, there is a significant difference (Chen et al., 2020).

3. MATERIALS AND METHODS

This paper can be classified as an applied research, as it aims to provide improvements in the current literature, with normative empirical objectives, aiming to develop policies and strategies that will improve the current condition (Bertrand & Fransoo, 2002; Cardoso et al., 2023b). The approach to the problem is quantitative, as the research method of modeling and simulation. The research steps were carried out following the sequence shown in Fig.1.

- Step 1: Experimental data were selected from a company in the South of Rio de Janeiro State. This choice was based on the fact that this work brings interesting data to be treated with the respective statistical analysis.
- Step 2: Paired T-Test for two samples using Minitab 19 software.
- Step 3: The interpretation of the results was carried out.
- Step 4: The situation of the problem was analyzed and possible decision making based on the results obtained.
- Step 5: The conclusions presented at the end of this article were drawn from the results obtained in the previous steps.

Figure1. Search method steps



Source: Authors (2026).

3.1. CASE STUDY

The problem to be solved is a comparison between two suppliers of foam for hospital beds. The question to be discussed is whether there is a comparison between the two types of foam. Two paired samples of size 90 units each are compared. An average foam size of 11 cm is required. Do any of the suppliers, with a 95% confidence interval, produce foam with an average size greater than 11 cm? Or Do any of the suppliers, with a 95% confidence interval, produce an average size smaller than 11 cm? This type of problem, i.e. comparing samples of the same size, fits perfectly with the application of the Paired Samples T-Test, so it was used with Minitab 19 software and the results were evaluated.

4. RESULTS AND DISCUSSION

4.1. CASE STUDY

Initially, the Anderson-Darling Normality Test was carried out using Minitab software. The first assumption is normality, which says that errors due to uncontrolled factors must have a zero mean and a normal distribution. For this purpose, the Anderson-Darling test was chosen, which has the following hypotheses:

H0: The data follow a Normal Distribution.

H1: The data does not follow a Normal Distribution.

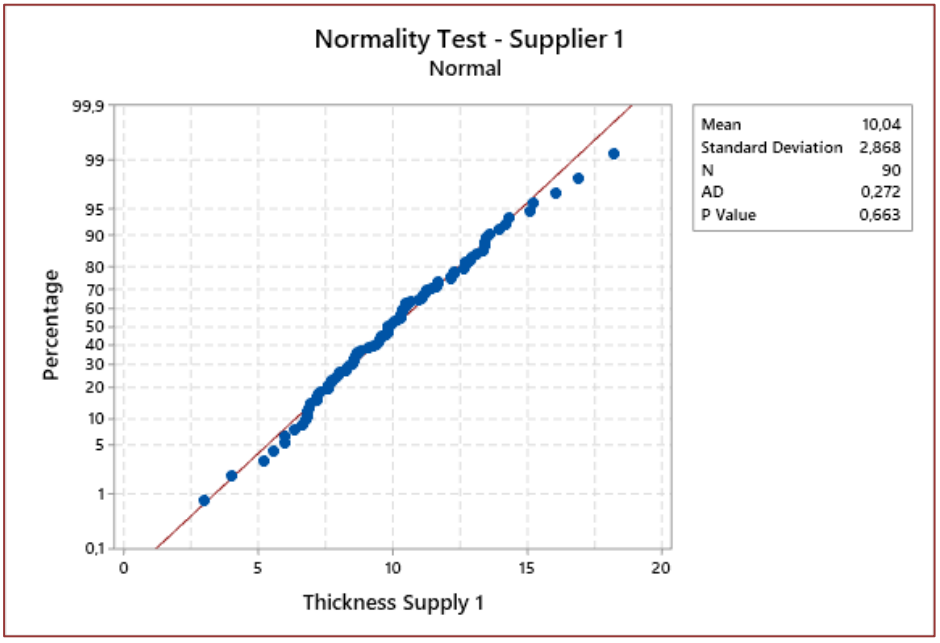
The first assumption is normality, which says that errors due to uncontrolled factors must have a zero mean and a normal distribution. For this purpose, the Anderson-Darling test was chosen, which has the following hypotheses:

H0: The data follow a Normal Distribution.

H1: The data does not follow a Normal Distribution.

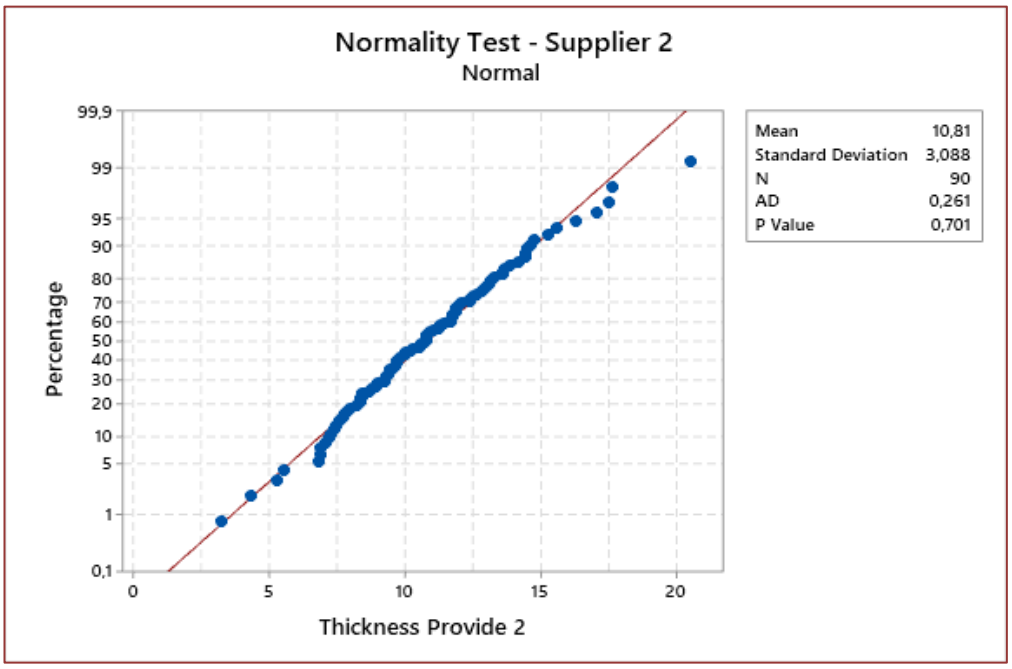
If the p-value is less than (0.05 or 5%), the null hypothesis that the data come from a Normal Distribution is rejected. In the case of supplier 1, as the p-value is 0.663, Ho is accepted, indicating that the data is normalized, as can be seen in Figure-1.

Figure1. Graph of the Anderson-Darling Test of Normal Distribution for Supplier 1 using Minitab 19 software



Source: Authors (2026).

Figure2. Graph of the Anderson-Darling Test of Normal Distribution for Supplier 2 using Minitab 19 software



Source: Authors (2026).

Similarly, in the case of Supplier 2, the data is also normalized with a p-value of 0.701. As the data is normalized, we can perform a paired T-test for two samples. In the case of the two-sample t-test, the hypotheses are as follows:

H_0: $\mu_1 - \mu_2 = 0$ if p-value > 0.05 H_1: $\mu_1 - \mu_2 \neq 0$ if p-value < 0.05

In Table 1, the p-Value was 0.083, much lower than 0.05, so Ho is rejected and H1 is accepted: the samples are different.

Table 1. T-test for the two samples.

T VALUE	DF	p-Value
-1,74	177	0,083

Source: Authors (2023).

For Supplier 1, as the P Value was less than 0.05, Ho is rejected and H1 is accepted,

i.e. the average is less than 11 cm (Table 2).

Table 2. T-test for Average 11 cm at Supplier 1

Null Hypothesis		H_0: μ = 11
Alternative Hypothesis		H_1: μ < 11
T Value	**P Value**	
-3,18	0,001	

Source: Authors (2023).

For Supplier 2, as the p-value was greater than 0.05 (0,284), Ho is accepted and H1 is rejected, i.e. the average is 11cm (Table 3).

Table 3. T-test for Average 11 cm at Supplier 1

Null Hypothesis		H_0: μ = 11
Alternative Hypothesis		H_1: μ < 11
T Value	**P Value**	
-0,57	0,284	

Source: Authors (2023).

5. FINAL CONSIDERATIONS

The aim of this study was to show the importance of using the Paired Sample T-Test in Logistics and Distribution, more specifically in the supply of foam mattresses. The second objective was to show the importance of this type of test in various comparisons of two paired samples. The results showed that supplier 1 produces a foam below the specified thickness of 11 cm while supplier 2 produces a foam within the specified value, so supplier 1 would be rejected and supplier 2's service would be used. A suggestion for future work would be to use this type of test in other areas such as sustainability and the environment.

REFERENCIAS

[1] Bertrand, J. W. M., & Fransoo, J. C. (2002). Operations management research methodologies using quantitative modeling. *International Journal of Operations and Production Management*, *22*(2), 241–264. https://doi.org/10.1108/01443570210414338

[2] Caixeta-Neta, A., Ribeiro, G. C., De Amorim, K. P., & Andrade, L. S. (2020). Electrochemical determination of thiabendazole pesticide extracted and preconcentrated from tomato samples by cloud point extraction. *Analytical Methods*, *12*(48), 5823–5832. https://doi.org/10.1039/d0ay01918f

[3] Cardoso, R.P ;Sampaio, N.A.S;Reis, J.S.M;Silva, D.E.W;Barros, J. G. . (2023). How to perform a simultaneous optimization with several response variables Como realizar uma otimização simultânea com várias variáveis de resposta. *Revista de Gestão e Secretariado*, *14*(1), 564–578. https://doi.org/10.7769/gesec.v14i1.1536

[4] Cardoso, R. P., Reis, J. S. D. M., Silva, D. E. W., Almeida, M. da gloria diniz de, Barros, J. G. M. de, & Sampaio, N. A. de S. (2023a). Scientific Research Trends About Metaheuristics in Process Optimization and Case Study Using the Desirability Function. *Revista de Gestão e Secretariado*, *14*(3), 3348–3367. https://doi.org/http://doi.org/10.7769/gesec.v14i3.1809

[5] Cardoso, R. P., Reis, J. S. D. M., Silva, D. E. W., Almeida, M. da gloria diniz de, Barros, J.

[6] G. M. de, & Sampaio, N. A. de S. (2023b). Scientific Research Trends About Metaheuristics in Process Optimization and Case Study Using the Desirability Function. *Revista de Gestão e Secretariado*, *14*(3), 3348–3367. https://doi.org/10.7769/gesec.v14i3.1809

[7] Chen, Y., Chen, M., Zhang, S., Ma, H., Wang, J., Lu, H., & Wu, Y. (2020). Rapid determination of geniposide in the extraction and concentration processes of lanqin oral solution by near-infrared spectroscopy coupled with chemometric algorithms. *Vibrational Spectroscopy*, *107*(January), 103023. https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2020.103023

[8] Conceição, R. D. P. da, & Pacheco, E. B. A. V. (2008). *De Espumas De Poliuretano : Um Estudo De Caso*. Costa, M. C. B. (2011). a Importância Do Ensino Da Ferramenta De Planejamento Fatorial Para Estudantes De Engenharia. *Cobenge*, 1–7.

i.da Silva, H. D. O. G., de Almeida, M. D. G. D., Barbosa, L. C. F. M., Costa, M. C. M., da Fonseca, B. B., Santos, G., Aguilera, M. V. C., Reis, J. S. D. M., & Sampaio, N. A. D.

[9] S. (2021). Improved Vehicle Painting Process Using Statistical Process Control Tools in an Automobile Industry. *International Journal for Quality Research*, *15*(4), 1245– 1262. https://doi.org/10.24874/IJQR15.04-14

[10] Espuny, M., Reis, J. S. da M., Anaya, Y. B., Cardoso, R. P., Sampaio, N. A. de S., Barbosa, L. C. F. M., & De Oliveira, O. J. (2022). Identification of Research gaps on Municipal Solid Waste Management from Data Indexed in the SCOPUS Database. *Revista de Gestão e Secretariado*, *13*(4), 2388–2402. https://doi.org/10.7769/gesec.v13i4.1478

[11] Fonseca, D;Correa, M.P.O;Santos, R.R;Cardoso, R.P;Reis, J.S.M;Sampaio, N. A. . (2023). Effect of pollution on physical and chemical water data : a multivariate statistical analysis Efeito da poluição nos dados físicos e químicos da água : uma análise estatística multivariada. *Revista de Engenharia Térmica*, *14*(5), 7353–7366. https://doi.org/10.7769/gesec.v14i5.2125

[12] Gomes, F. da S., Camargo, P. R., Reis, J. S. da M., Diogo, G. M. M., Cardoso, R. P., Barros, J. G. M. de, Sampaio, N. A. de S., Barbosa, L. C. F. M., & Santos, G. (2022). The Main Benefits of Application of Six Sigma for Productive Excellence. *Quality Innovation Prosperity*, *26*(3), 151–167. https://doi.org/10.12776/qip.v26i3.1712

[13] Leiroz, F. D. O., Manhães, M., & Sampaio, N. A. de S. (2023). Using Taguchi ' s experiments part II : creating a computer for heavy games and image processing Usando as experiências de Taguchi parte II : criando um computador para jogos pesados e processamento de imagem. *Revista de Gestão e Secretariado*, *14*(7), 12152–12164. https://doi.org/10.7769/gesec.v14i7.2529

[14] Lima, K. H. C. de, Ferreira, J. M. de M., Filho, M. C. C. da S., & Pompeu, A. M. (1980). A IMPORTÂNCIA DA LOGÍSTICA EMPRESARIAL NA. *Ciências Exatas e Tecnológicas*, *5*(1), 29–42.

[15] Mazza, Felipe C., Santos, I. J. O. dos, Sampaio, N. A. S., Mangelli, L. N. R., & Mühlen, C. von. (2023). *Analysis of Endosulfan Isomers and other Pesticides in Surface Water of the Paraíba do Sul River Basin by Solid Phase Extraction and Comprehensive Two- Dimensional Gas Chromatography Coupled with Time-of-Flight Mass Spectrometry*. *00*(00), 1–9. https://doi.org/10.21577/0103-5053.20230145

[16] Mazza, Felipe Cury, de Souza Sampaio, N. A., & von Mühlen, C. (2022). Hyperspeed method for analyzing organochloride pesticides in sediments using two-dimensional gas chromatography–time-of-flight mass spectrometry. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, *0123456789*. https://doi.org/10.1007/s00216-022-04464-y

[17] Montgomery, D. C. (2009). *Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade*. LTC.

[18] Montgomery, D. C. (2017). Design and Analysis of Experiments. In *Wiley* (9°). Wiley.

[19] Moura, R. Q. De, Rodrigues, I. A. M., & Sampaio, N. A. de S. (2023). Using Taguchi ' s experiments part i : creating a golf ball that reaches a maximum range Usando os experimentos de Taguchi parte i : criando uma bola de golfe que atinja um alcance máximo. *Revista de Gestão e Secretariado*, *14*(7), 11748–11757. https://doi.org/10.7769/gesec.v14i7.2502

[20] Reis, J. S. da M., Cardoso, R. P., Silva, D. E. W., Almeida, M. da G. D. de, Barros, J. G. M. de, Sampaio, N. A. de S., & Barbosa, L. C. F. M. (2023). The Titans Sustainability and Industry 4.0 Working for The Planet Earth. *Revista de Gestão e Secretariado*, *14*(2), 1953–1965. https://doi.org/10.7769/gesec.v14i2.1674

[21] Reis, J. S. da M., Espuny, M., Cardoso, R. P., Sampaio, N. A. de S., Barros, J. G. M. De, Barbosa, L. C. F.

M., & Oliveira, O. J. De. (2022). Mapping Sustainability 4.0: contributions and limits of the symbiosis. *Revista de Gestão e Secretariado*, *13*(3), 1426–1438. https://doi.org/10.7769/gesec.v13i3.1417

[22] Reis, J. S. da M., Neto, R. S. P., Espuny, A. L. G., Barros, J. G. M. de, Sampaio, N. A. de S., & Barbosa, L. C. F. M. (2023). New Indicators for Commercial Technical Support

[23] Development. *Revista de Gestão e Secretariado*, *14*(5), 8272–8285. https://doi.org/0.7769/gesec.v14i5.2210

[24] Rezende, M. D., Rosa, C. S. da, Cardoso, R. P., Reis, J. S. da M., & Sampaio, N. A. de S. (2023). Statistics as a Tool for Decision Making in Agricultural and Environmental Experiments. *Revista de Gestão e Secretariado*, *14*(4), 5204–5217. https://doi.org/10.7769/gesec.v14i4.1978

[25] Rubert, C. K., De Carvalho, C. P., De Almeida, M. da G. D., De Barros, J. G. M., & Sampaio, N. A. de S. (2023). Development of automotive packaging by applying the QFD method. *Revista de Gestão e Secretariado (Management and Administrative Professional Review)*, *14*(6), 10527–10548. https://doi.org/10.7769/gesec.v14i6.2391

[26] Sales, J. P. De, Salvador, J., Bastos, B., Araujo, A. H. De, Almeida, G. De, & Santos, G. (2021). *Barbosa QUALITY MANAGEMENT IN THE CONTOURS OF CONTINUOUS*. *16*(3), 689–702. https://doi.org/10.24874/ijqr16.03-02

[27] Sampaio, N. A. de S., Reis, J. S. da M., Espuny, M., Cardoso, R. P., Gomes, F. M., Pereira, F. M., Ferreira, L. C., Barbosa, M., Santos, G., & Silva, M. B. (2022). Contributions to the future of metaheuristics in the contours of scientific development. *Gestão & Produção*, *29*(1), 1–19. https://doi.org/10.1590/1806-9649-2022v29e099

[28] Santana, L. B. de, Rodrigues, V. F., & Sampaio, N. A. de S. (2023). Simultaneous optimization response surface experiments with several response variables Experimentos de superfície de resposta de otimização simultânea com várias variáveis de resposta. *Revista de Gestão e Secretariado*, *14*(6), 9461–9471. https://doi.org/10.7769/gesec.v14i6.2310

[29] Segman, Y. (Joseph), & Sheiman, E. (2018). Post marketing study of hemodynamic and hematological noninvasive readings in a blood bank. *SAGE Open Medicine*, *6*. https://doi.org/10.1177/2050312118796065

[30] Yamada, J. T., Viana, R. S. E., Santos, R. R., Carvalho, C. P. de, Almeida, M. da G. D. de, Barros, J. G. M. de, & Sampaio, N. A. de S. (2023). Use of factorial design with significant interaction and Tukey ' s Test in agricultural and environmental experiments Uso de planejamento fatorial com interação significativa e teste de Tukey em experimentos agrícolas e ambientais. *Revista de Gestão e Secretariado*, *14*(6), 9815–9828. https://doi.org/10.7769/gesec.v14i6.23351–23. https://doi.org/10.26668/businessreview/2023.v8i8.3131

[31] Antônio, N., Sampaio, D. S., Sérgio, S., Siqueira, S. De, Diniz, G., Mazza, F. C., Ercio, J., Junior, M., Kawakani, M. L., & Isaac, G. (2025). *APPLICATIONOF FULL FACTORIAL PLANNING TO CONTROL NITROGEN IN A WATER RESOURCE*. 1–13. https://doi.org/10.24857/rgsa.v19n1-128

[32] Bertrand, J. W. M., & Fransoo, J. C. (2002). Operations management research methodologies using quantitative modeling. *International Journal of Operations and Production Management*, *22*(2), 241–264. https://doi.org/10.1108/01443570210414338

[33] Borges, E. J., Abreu, L. D. de, Prates, G. A., Brenny, G. M., Miranda Junior, J. E., & Sampaio, N. A. de S. (2024). Using the Non-Homogeneous Poisson Process (Duane's Model) to Analyze the Number of Failures in Industrial Equipment. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, *18*(5), e07922. https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n5-188

[34] Cardoso, R. P., Reis, J. S. da M., Sampaio, N. A. de S., Barros, J. G. M. de, Barbosa, L. C. F. M., & Santos, G. (2022). Sustainable Quality Management: Unfoldings, trends and perspectives from the Triple Bottom Line. *Proceedings on Engineering Sciences*, *4*(3), 359–370. https://doi.org/10.24874/PES04.03.013

[35] Carvalho, C. P. de. (2023). *ANALYSIS OF PAYMENT METHODS FOR A CANDY DISTRIBUTOR USING BI TOOLS Cleginaldo Pereira de Carvalho A Article history : Dashboard ; Google Sheets ; Currently , companies are looking for mechanisms to stand out and gain a competitive advantage in the marketp*. *January*, 1–24. https://doi.org/10.26668/businessreview/2023.v8i3.952

[36] Chakraborty, S., Agarwal, S., & Dandge, S. S. (2018). Analysis of Cotton Fibre Properties: A Data Mining Approach. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series E*, *99*(2), 163–176.

https://doi.org/10.1007/s40034-018-0125-4

[37] Coelho de Oliveira, H., Elias da Cunha Filho, J. C., Rocha, J. C., & Fernández Núñez, E. G. (2017). Rapid monitoring of beer-quality attributes based on UV-Vis spectral data. *International Journal of Food Properties*, *20*(July), 1686–1699. https://doi.org/10.1080/10942912.2017.1352602

[38] da Motta Reis, J. S., de Souza Sampaio, N. A., de Barros, J. G. M., Cardoso, R. P., Werderits, D. E., Santos, S. G., & Barbosa, L. C. F. M. (2023). Contribution of Lean Manufacturing Concepts To Reducing Waste in Destructive Testing. *Proceedings on Engineering Sciences*, *5*(4), 627–636. https://doi.org/10.24874/PES05.04.005

[39] De Almeida, M. D. G. D., Marins, F. A. S., Salgado, A. M. P., Bittar, R. D. C. D. S. M., De Barros, J. M., Junior, A. H., De Souza Sampaio, N. A., Da Fonseca, B. B., Baronto, G. N. D., & Côrtes, A. D. S. (2020). Industrial internship mentoring model for industrial engineering education in public universities. *International Journal of Engineering Education*, *36*(1A).

[40] de Araújo, M. J. F., de Araújo, M. V. F., de Araújo, A. H., de Barros, J. G. M., de Almeida, M. da G., da Fonseca, B. B., Reis, J. S. d. M., Barbosa, L. C. F. M., Santos, G., & Sampaio, N. A. S. (2021). Pollution credit certificates theory: An analysis on the quality of solid waste management in Brazil. *Quality Innovation Prosperity*, *25*(3), 1–17. https://doi.org/10.12776/qip.v25i3.1574

[41] Derksen, C., Ledrew, E., Walker, A., & Goodison, B. (2000). Winter season variability in North American prairie SWE distribution and atmospheric circulation. *Hydrological Processes*, *14*(18), 3273–3290. https://doi.org/10.1002/1099-1085(20001230)14:18<3273::AID-HYP203>3.0.CO;2-W

[42] Espuny, A. L. G., Espuny, M., Costa, A. C., da Motta Reis, J. S., de Souza Sampaio, N. A., Barbosa, L. C. F. M., Santos, G., & de Oliveira, O. J. (2023). Determinants of Intent To Purchase Organic Products To Improve Quality of Life. *International Journal for Quality Research*, *17*(2), 441–454. https://doi.org/10.24874/IJQR17.02-09

[43] Febriani, R. A., Park, H. S., & Lee, C. M. (2020). A rule-based system for quality control in brake disc production lines. *Applied Sciences (Switzerland)*, *10*(18). https://doi.org/10.3390/APP10186565

[44] Godinho, M. D. S., Pereira, R. O., Ribeiro, K. D. O., Schimidt, F., De Oliveira, A. E., & De Oliveira, S. B. (2008). Classificação de refrigerantes através de análise de imagens e análise de componentes principais (PCA). *Quimica Nova*, *31*(6), 1485–1489. https://doi.org/10.1590/S0100-40422008000600039

[45] Gomes, F. da S., Camargo, P. R., Reis, J. S. da M., Diogo, G. M. M., Cardoso, R. P., Barros, J. G. M. de, Sampaio, N. A. de S., Barbosa, L. C. F. M., & Santos, G. (2022). The Main Benefits of Application of Six Sigma for Productive Excellence. *Quality Innovation Prosperity*, *26*(3), 151–167. https://doi.org/10.12776/qip.v26i3.1712

[46] Gomes, F. M., Ymamura, C. S., de Souza Sampaio, N. A., Pereira, F. M., Andrade, H. de S., & Silva, M. B. (2023). Optimisation of Multiple Response Processes Using Different Modelling Techniques. *Quality Innovation Prosperity*, *27*(3), 18–36. https://doi.org/10.12776/QIP.V27I3.1899

[47] Guimarães, B. O., dos Reis, J. A. T., Mendonça, A. S. F., & Akabassi, L. (2016). Análise probabilística de parâmetros de qualidade da água para suporte ao processo de enquadramento de cursos d'água. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, *21*(4), 807–815. https://doi.org/10.1590/S1413-41522016143190

[48] INEA. (2022). Avaliação diagnóstica da geração de resíduos de uma Unidade de Alimentação e Nutrição instituciona. *REVISTA INEANA*. Junior, A. M. da C., Barros, J. G. M. de, Almeida, M. da G. D. de, Carvalho, C. P. de, & Sampaio, N. A. de S. (2023). *Application of the poisson distribution in the prediction of the number of defects in a textile factory Aplicação da distribuição de poisson na predição do número de defeitos em uma fábrica têxtil*. *14*(8), 14378–14386. https://doi.org/10.7769/gesec.v14i8.2671

[49] Leoni, R.C., de Souza Sampaio, N. A., & Corrêa, S. M. (2017). Multivariate analysis applied to air quality study. *Revista Brasileira de Meteorologia*, *32*(2). https://doi.org/10.1590/0102-77863220005

[50] Leoni, Roberto Campos, de Souza Sampaio, N. A., & Corrêa, S. M. (2017). Estatística Multivariada Aplicada ao Estudo da Qualidade do Ar. *Revista Brasileira de Meteorologia*, *32*(2), 235–241. https://doi.org/10.1590/0102-77863220005

[51] Massone, C. G., & dos Santos, A. A., Ferreira, P. G., & Carreira, R. da S. (2023). ersistent Organic Pollutants (POPs) in Sardine (Sardinella brasiliensis): Biomonitoring and Potential Human Health Effects. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *3*.

[52] Mazza, F. C., de Souza Sampaio, N. A., & von Mühlen, C. (2022). Hyperspeed method for analyzing organochloride pesticides in sediments using two-dimensional gas chromatography–time-of-flight mass spectrometry. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, *0123456789*. https://doi.org/10.1007/s00216-022-04464-y

[53] Mazza, F. C., Lima, A. C. da S., Sampaio, N. A. de S., De Almeida, M. da G. D., Miranda Junior, J. E., & De Abreu, L. D. (2024). Preliminary Results of Spadns Treatment by Electroflocculation With Iron Electrodes. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, *18*(1), e04784. https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n1-068

[54] Njuguna, S. M., Onyango, J. A., Babu, K., Githaiga, R. W., & Gituru, X. Y. (2019). Application of multivariate statistical analysis and water quality index in health risk assessment by domestic use of river water. Case study of Tana River in Kenya. *Journal Pre-Proof*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.11.006

[55] Peeters, J. P., & Martinelli, J. A. (1989). Hierarchical cluster analysis as a tool to manage variation in germplasm collections. *Theoretical and Applied Genetics*, *78*(1), 42–48. https://doi.org/10.1007/BF00299751

[56] Pessoa, M. A. R., de Souza, F. J., Domingos, P., & de Azevedo, J. P. S. (2020). IQAFAL — Fuzzy water quality index for lotic environments. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, *25*(1), 21–30. https://doi.org/10.1590/s1413-41522020147587

[57] Reis, J. S. D. M., Silva, D. E. W., Sampaio, N. A. de S., Barros, J. G. M. de, Santos, G., & Barbosa, L. C. F. M. (2024). The Benefits of FMEA in Improving The Industrial Process of a Cabin Air Carrier. *Proceedings on Engineering Sciences*, *6*(3), 1031–1040. https://doi.org/10.24874/PES06.03.016

[58] Sales, J. P. de, Reis, J. S. da M., Barros, J. G. M. de, Fonseca, B. B. da, Junior, A. H. de A., Almeida, M. da G. D. de, Barbosa, L. C. F. M., Santos, G., & Sampaio, N. A. de S. (2022). Quality Management in The Contours of Continuous Product Improvement. *International Journal for Quality Research*, *16*(3), 689–702. https://doi.org/10.24874/IJQR16.03-02

[59] Sampaio, N. A. S., Mazza, F. C., Sérgio, S., Siqueira, S. De, Abreu, L. D. De, & Lima, R. M. De. (2024). *APPLICATION OF THE NON-PARAMETRIC SIGNALS TEST TO A COMPANY João Ercio Miranda Junior 4 1 INTRODUCTION During the last century , statistics revolutionized science by presenting useful models that modernized the research process in the direction of better* . 1–13.

[60] Sampaio, N. A. S., Mazza, F. C., Siqueira, S. S. S. de, Miranda Junior, J. E., Moutinho, J. V. de S., & Pacífico, L. de O. (2024). Applications of Correlation Analysis in Environmental Problems. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, *18*(3), e04925. https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n3-085

[61] Sampaio, Nilo Antônio de Souza, Carvalho, E., Almeida, M. da G. D. de, Barros, J. G. M. de, Junior, J. E. M., Paula, E. R. M. de, & Prata, D. S. (2025). APPLYING THE MOOD. MEDIAN TEST TO AN ENVIRONMENTAL PROBLEM. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, *19*(2). https://doi.org/10.24857/rgsa.v19n2-046

[62] Sampaio, Nilo Antonio de Souza, Júnior, J. E. M., Almeida, M. da G. D. de, Abreu, L. D. de, & Cardoso, R. P. (2024). Applications of Factor Analysis and Response Surface Methodology in Chemical Process Optimization Problems. *International Journal of Professional Business Revieweview*, *9*(1), 1–14. https://doi.org/10.26668/businessreview/2024.v9i1.4284

[63] Sampaio, Nilo Antônio de Souza, Silva, C. E. da, Miranda, F. F. de, Prates, G. A., Siqueira, S. S. S., De, Miranda, I. T. de, & Vieira, M. R. (2025). *USING TAGUCHI ' S EXPERIMENTS PART III : CHOOSING RAW MATERIALS ACCORDING TO PROCESS YIELDS*. 1–12.

[64] Semagn, K., Bjornstad, A., Stedje, B., & Bekele, E. (2000). Comparison of multivariate methods for the analysis of genetic resources and adaptation in Phytolacca dodecandra using RAPD. *Theoretical and Applied Genetics*, *101*(7), 1145–1154. https://doi.org/10.1007/s001220051591

[65] Silva, A. C. P. da, Pasini, V. D., Aguilera, M. V. C., Fonseca, B. B. da, Sampaio, N. A. de S., Reis, J. S. da M., Santos, G., & Barbosa, L. C. F. M. (2023). Mapping the Accidents and Unsafe Conditions of Workers in the Automotive Sector. *Quality Innovation Prosperity*, *27*(2), 139–157. https://doi.org/10.12776/QIP.V27I2.1849

[66] Tokuda, E. N., Lima, C. G. da R., & Oliveira, J. N. de. (2023). *SPATIAL AND TEMPORAL ANALYSIS OF DROUGHT EVENTS IN UPPER PARANÁ RIVER HYDROGRAPHIC REGION (BRAZIL) FROM 1990 TO 2020 Article history : 2020*, 1–23.

[67] Vasconcelos, T. R. de O., Savi, A. F., Prates, G. A., Brenny, G. M., Galli, L. C. do L. A., & Sampaio, N. A. de S. (2024). How to Perform a Statistical Analysis of Non-Destructive Degradation Data to Study Crack Growth in Wind Blades as a Function of the Number of Cycles. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, *18*(7), e08192. https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n7-169

[68] Vieira, P. de C. (2008). Avaliação das condições de qualidade da água em tempo seco e durante eventos de chuvas em uma microbacia urbanizada no município de Belo Horizonte. *UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS*, 98.

Capítulo 11

Using the attribute control chart to monitor a chemical manufacturing process

Nilo Antonio de Souza Sampaio
Claudio Tavares
Hugo Pimentel Tavares

Abstract: The chemical and pharmaceutical industries have quality as a prerequisite for the smooth running of their processes. Quality monitoring in this type of industrial activity is carried out using attribute control charts, among others. The aim of this article is to show a case study carried out in a company in the south of the state of Rio de Janeiro which used this type of control chart, more specifically the NP control chart, to monitor an antibiotic manufacturing process. The results showed the need for some adjustments and management actions will be taken to improve the process.

Keywords: Statistical Software. Control Charts by Atributes. NP Chart. Drug Manufacturing Process

1. INTRODUCTION

The launch of a new product and/or process usually involves working with a large number of variables. Conscientious planning of the experiments that must be used to manipulate these variables and arrive at the desired answers is indispensable if reliable results are to be obtained and if consistent statistical analyses are to be carried out. In this context, it is no longer possible to develop products and processes through trial and error procedures, as was done at the beginning of the last century. The strong competition, the diffusion of technological processes as well as the responsibility of the scientific community now make such procedures unfeasible. The optimization of processes and products requires more than ever a robust statistical study. Control charts are used for the purpose of detecting assignable causes that affect process stability(A. F.B. Costa & Rahim, 2004; M. C. B. Costa, 2011; Sales et al., 2021).

The main objectives of using SPC (Statistical Process Control) are to get to know the production process in order to assess quality, prevent defects, avoid waste, eliminate anything that compromises efficiency and reduce costs. The characteristics of using SPC within a company's production processes are: rapid reporting of defects and immediate corrective action; any information is relevant (working with sample results); defect prevention and the task of all areas linked to production. SPC can be used to control variable quantities that can be measured, such as dimensions or weight, for example. In this case, control charts of the averages and ranges of samples taken during the production process are used. SPC can also be used to control attribute-type quantities, which do not need a measuring instrument to be known, such as scratches or stains on paint, for example. In these cases, P-type control charts are used, which check the percentage of defective products, or C-type charts, which check the number of defects per piece (CASTRO et al., 2012).

Quality is a challenge and needs to be implemented for industrial processes to occur with sustainability to have a real impact on reducing and consequently eliminating environmental damage. Statistics is an essential tool and has been used in several applications and in all areas of human knowledge to improve processes, as decision making and to ensure that the environment is preserved (Cardoso, R.P ;Sampaio, N.A.S;Reis, J.S.M;Silva, D.E.W;Barros, 2023; Cardoso et al., 2023a, 2023b; H. D. O. G. da Silva et al., 2021; Fonseca, D;Correa, M.P.O;Santos, R.R;Cardoso, R.P;Reis, J.S.M;Sampaio, 2023; Gomes et al., 2022; Felipe C. Mazza et al., 2023; Reis, Espuny, Cardoso, Sampaio, de Barros, et al., 2022; Reis, Cardoso, et al., 2023; Rezende et al., 2023; Rubert et al., 2023; A. C. P. da Silva et al., 2023; Yamada et al., 2023).

The control chart by attributes is simpler, as it only consists of visually identifying whether the process is satisfactory or not. Therefore, in order to use the control chart by attributes, we must separate the data that will be analyzed into data referring to defects or defective. The product may have defects, but it is only considered defective if the customer does not tolerate such defects. In this way, control charts by attributes are recommended for use when you want to control the number or percentage of defective items in a given total of items.The control chart by attribute np has the characteristic of a binominal distribution and its approach is to identify the number of items with defects. Although Attribute Control Charts were created to monitor processes, today their application is much broader, also covering the service area. Once the special causes have been diagnosed and eliminated, an np chart can be drawn up for each aspect of a process or service(Antonio Fernando Branco Costa et al., 2016). In view of the above, the research question that guided this work is: to visualize a practical application of

Attribute Control Charts. The aim of this work is to show this application, but specifically to show the application of the NP Chart, which has great power to carry out statistical process control. Initially, the article will cover the concepts of Attribute Control Charts, more specifically NP Charts and the case study in question. Next, the results and discussions of the proposed objective will be presented. Finally, the conclusion will be presented with suggestions for future studies.

2. THEORETICAL BACKGROUND

Today, statistics has made a significant contribution to the decision-making process because much of what is produced is based on quantitative methods, and statistics is one such area. In the information and knowledge age, statistics uses mathematics to support business professionals, government and researchers (Cardoso et al., 2023b; Fonseca, D;Correa, M.P.O;Santos, R.R;Cardoso, R.P;Reis, J.S.M;Sampaio, 2023; Junior et al., 2023; Leiroz et al., 2023; Felipe Cury Mazza et al., 2022; Moura et al., 2023; Oliveira et al., 2023; Reis, Espuny, Cardoso, Sampaio, Barros, et al., 2022; Reis, Neto, et al., 2023).

To analyze the results of the control chart, we need to review the definitions of common causes and special causes. Thus, all variations that occur between the SCL and the SCL are considered common cause variations, as long as they are random. Therefore, all variations that occur above the LSC or below the LIC are considered special cause variations and must be resolved. However, if there is any pattern between the variations (even if they are within the limits of the SCL and SIL), it means that the process is not compliant and that there are special causes. (Montgomery, 2009).

Common causes are those that are commonplace and inherent to the process, which are relatively predictable and expected. Special causes are those that are unknown and can cause major changes in the process. There are several ways of detecting special causes:

- Points outside the control limit: Points within the upper and lower control limits show that the process has suffered variations from common causes. In this sense, if one or more points cross these lines, the variations have occurred due to special causes. In this case, the manager should pay attention to this factor.
- Periodicity: If the graph shows a variation of values up and down, with a frequency in similar intervals, it means that some point in the process needs to be adjusted.
- Sequence: When seven or more points appear on one side of the average line (above or below), it is an alert to observe that point and then look for some potential improvement.
- Trend: Occurs when seven or more points appear continuously, up or down, like a trend line. It is therefore possible that a particular cause is at work at this stage of the process and needs to be assessed.
- Approaching the control limits: If two or more lines are very close to the upper or lower control lines, this is a sign of instability. Thus, the closer the points are to the average line, the more stable the process will be (Chen et al., 2014).

The NP chart (Number of Non-Conforming Units) requires the sample sizes to be equal and to remain constant. It is based on the number of non-conforming items and is used when the actual number is more expressive and easier to record. The parameters for calculating the control limits for the defective proportion chart are: individual points,

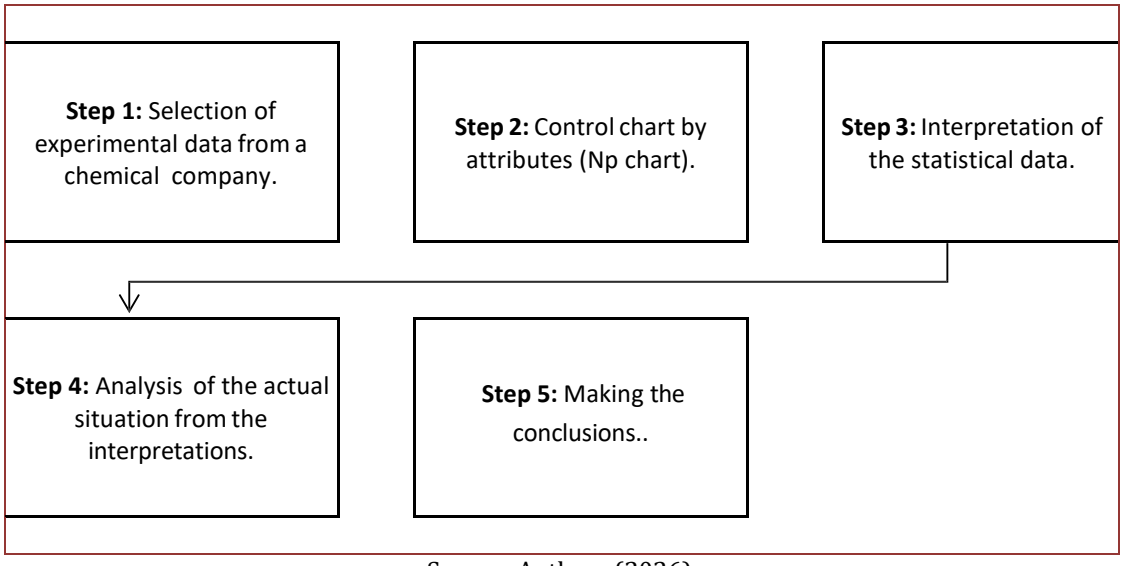
Center Line (average defective proportion - average of proportions), Upper Control Limit and Lower Control Limit. If the lower control limit is less than zero, then it should be = 0. If the upper control limit is greater than 1, it must be equal to 1. This is because there is no way that the number of defective parts can be less than zero, or greater than the sample size (Gadre & Rattihalli, 2005; Khoo, 2004; Leiva et al., 2015).

3. MATERIALS AND METHODS

This paper can be classified as an applied research, as it aims to provide improvements in the current literature, with normative empirical objectives, aiming to develop policies and strategies that will improve the current condition (Stüpp et al., 2015). The approach of the problem is quantitative, as the research method of modeling and simulation. The research steps were carried out following the sequence shown in Figure.1.

- Step 1: The experimental data was selected from a chemical company in the south of the state of Rio de Janeiro. This choice was based on the fact that the company had a process that could be monitored using a control chart by attributes.
- Step 2: Making a control chart by attributes (Np chart) for the manufacture of a certain type of antibiotic using Minitab 19 software.
- Step 3: The interpretation of the results was carried out.
- Step 4: The situation of the problem was analyzed and possible decision making based on the results obtained.
- Step 5: The conclusions presented at the end of this article are drawn from the results obtained in the previous steps.

Figure1. Search method steps



Source: Authors (2026).

3.1. CASE STUDY

A quality engineer assesses whether the process used to manufacture a certain type of antibiotic is under control. The engineer tests 500 products per hour in three 8-hour shifts and records the number of products that fail the company's quality test.

Table 1. Number of defects in the 24 hours monitored

ID	Defects
101	5
102	8
103	13
104	11
105	8
106	6
107	5
108	3
109	1
110	6
111	4
112	12
113	6
114	8
115	13
116	17
117	4
118	5
119	4
120	9
121	7
122	2
123	3
124	6

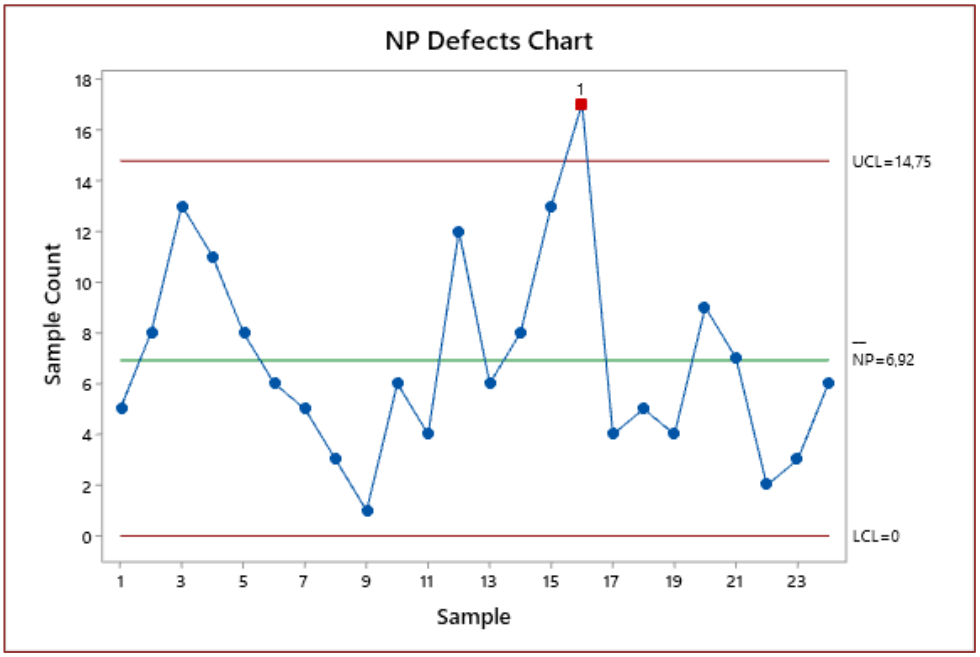
Source: Authors (2023).

4. 4. RESULTS AND DISCUSSIONS

4.1. CASE STUDY

Figure 2 shows that one point is out of control on the NP chart (the test failed at point 16). There is probably an attributable variation, because when there are only random causes the process is under Statistical Control. One of the reasons for considering the process out of control is a point above the Upper Control Limit or below the Lower Control Limit. The engineer concludes that the process is not stable and must be improved.

Figure2. Control chart for Attributes (NP) for the Chemical Process using Minitab 19 software



Source: Authors (2026).

5. FINAL CONSIDERATIONS

The aim of this study was to show the importance of using Attribute Control Charts for quality control in industrial processes. Processes with points outside the control limits need to be studied and analyzed to find the special causes. A suggestion for future work would be to use other types of control charts in chemical companies to improve the production process.

REFERENCIAS

[1] Cardoso, R.P ;Sampaio, N.A.S;Reis, J.S.M;Silva, D.E.W;Barros, J. G. . (2023). How to perform a simultaneous optimization with several response variables Como realizar uma otimização simultânea com várias variáveis de resposta. *Revista de Gestão e Secretariado*, *14*(1), 564–578. https://doi.org/10.7769/gesec.v14i1.1536

[2] Cardoso, R. P., Reis, J. S. D. M., Silva, D. E. W., Almeida, M. da gloria diniz de, Barros, J. G. M. de, & Sampaio, N. A. de S. (2023a). Scientific Research Trends About Metaheuristics in Process Optimization and Case Study Using the Desirability Function. *Revista de Gestão e Secretariado*, *14*(3), 3348–3367. https://doi.org/10.7769/gesec.v14i3.1809

[3] Cardoso, R. P., Reis, J. S. D. M., Silva, D. E. W., Almeida, M. da gloria diniz de, Barros, J. G. M. de, & Sampaio, N. A. de S. (2023b). Scientific Research Trends About Metaheuristics in Process Optimization and Case Study Using the Desirability Function. *Revista de Gestão e Secretariado*, *14*(3), 3348–3367. https://doi.org/http://doi.org/10.7769/gesec.v14i3.1809

[4] CASTRO, D. R. C., Ramos, M. O., Costa, D. de O., SOUZA, V. F. DE, & Negrao, L. L. L. (2012). a Aplicabilidade Dos Gráficos De Controle Nas Empresas Como Modelo De Inspeção Para a Avaliação Da Qualidade. *Xxxii Encontro Nacional De Engenharia De Producao*, *November 2012*.

[5] Chen, Y., Corr, D. J., & Durango-Cohen, P. L. (2014). Analysis of common-cause and special-cause variation in the deterioration of transportation infrastructure: A field application of statistical process

control for structural health monitoring. *Transportation Research Part B: Methodological*, *59*, 96–116. https://doi.org/10.1016/j.trb.2013.11.002

[6] Claro, F. A. E., Costa, A. F. B., & Machado, M. A. G. (2007). EWMA and $\bar{X}$ control charts for the monitoring of autocorrelated processes. *Producao*, *17*(3), 536–546. https://doi.org/10.1590/s0103-65132007000300010

[7] Costa, A. F.B., & Rahim, M. A. (2004). Monitoring process mean and variability with one non-central chi-square chart. *Journal of Applied Statistics*, *31*(10), 1171–1183. https://doi.org/10.1080/0266476042000285503

[8] Costa, Antonio Fernando Branco, Epprecht, E. K., & Carpinetti, L. C. R. (2016). *Controle Estatístico da Qualidade* (2a ed.). Atlas.

[9] Costa, M. C. B. (2011). a Importância Do Ensino Da Ferramenta De Planejamento Fatorial Para Estudantes De Engenharia. *Cobenge*, 1–7.

[10] da Silva, H. D. O. G., de Almeida, M. D. G. D., Barbosa, L. C. F. M., Costa, M. C. M., da Fonseca, B. B., Santos, G., Aguilera, M. V. C., Reis, J. S. D. M., & Sampaio, N. A. D.

[11] S. (2021). Improved Vehicle Painting Process Using Statistical Process Control Tools in an Automobile Industry. *International Journal for Quality Research*, *15*(4), 1245–1262. https://doi.org/10.24874/IJQR15.04-14

[12] Fonseca, D;Correa, M.P.O;Santos, R.R;Cardoso, R.P;Reis, J.S.M;Sampaio, N. A. . (2023). Effect of pollution on physical and chemical water data : a multivariate statistical analysis Efeito da poluição nos dados físicos e químicos da água : uma análise estatística multivariada. *Revista de Engenharia Térmica*, *14*(5), 7353–7366. https://doi.org/10.7769/gesec.v14i5.2125

[13] Gadre, M. P., & Rattihalli, R. N. (2005). Some Group Inspection Based Multi-Attribute Control Charts to Identify Process Deterioration. *Stochastics and Quality Control*, *20*(2), 191–204. https://doi.org/10.1515/EQC.2005.191

[14] Gomes, F. da S., Camargo, P. R., Reis, J. S. da M., Diogo, G. M. M., Cardoso, R. P., Barros, J. G. M. de, Sampaio, N. A. de S., Barbosa, L. C. F. M., & Santos, G. (2022). The Main Benefits of Application of Six Sigma for Productive Excellence. *Quality Innovation Prosperity*, *26*(3), 151–167. https://doi.org/10.12776/qip.v26i3.1712

[15] Junior, A. M. da C., Barros, J. G. M. de, Almeida, M. da G. D. de, Carvalho, C. P. de, & Sampaio, N. A. de S. (2023). *Application of the poisson distribution in the prediction of the number of defects in a textile factory Aplicação da distribuição de poisson na predição do número de defeitos em uma fábrica têxtil*. *14*(8), 14378–14386. https://doi.org/10.7769/gesec.v14i8.2671

[16] Khoo, M. B. C. (2004). A moving average control chart for monitoring the fraction non-conforming. *Quality and Reliability Engineering International*, *20*(6), 617–635. https://doi.org/10.1002/qre.576

[17] Leiroz, F. D. O., Manhães, M., & Sampaio, N. A. de S. (2023). Using Taguchi ' s experiments part II : creating a computer for heavy games and image processing Usando as experiências de Taguchi parte II : criando um computador para jogos pesados e processamento de imagem. *Revista de Gestão e Secretariado*, *14*(7), 12152–12164. https://doi.org/10.7769/gesec.v14i7.2529

[18] Leiva, V., Marchant, C., Ruggeri, F., & Saulo, H. (2015). A criterion for environmental assessment using Birnbaum-Saunders attribute control charts. *Environmetrics*, *26*(7), 463–476. https://doi.org/10.1002/env.2349

[19] Mazza, Felipe C., Santos, I. J. O. dos, Sampaio, N. A. S., Mangelli, L. N. R., & Mühlen, C. von. (2023). *Analysis of Endosulfan Isomers and other Pesticides in Surface Water of the Paraíba do Sul River Basin by Solid Phase Extraction and Comprehensive Two-Dimensional Gas Chromatography Coupled with Time-of-Flight Mass Spectrometry*. *00*(00), 1–9. https://doi.org/10.21577/0103-5053.20230145

[20] Mazza, Felipe Cury, de Souza Sampaio, N. A., & von Mühlen, C. (2022). Hyperspeed method for analyzing organochloride pesticides in sediments using two-dimensional gas chromatography–time-of-flight mass spectrometry. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, *0123456789*. https://doi.org/10.1007/s00216-022-04464-y

[21] Montgomery, D. C. (2009). *Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade*. LTC.

[22] Moura, R. Q. De, Rodrigues, I. A. M., & Sampaio, N. A. de S. (2023). Using Taguchi ' s experiments

part i : creating a golf ball that reaches a maximum range Usando os experimentos de Taguchi parte i : criando uma bola de golfe que atinja um alcance máximo. *Revista de Gestão e Secretariado*, *14*(7), 11748–11757. https://doi.org/10.7769/gesec.v14i7.2502

[23] Oliveira, A. C. De, Barros, J. G. M. de, Almeida, M. da G. D. de, Carvalho, C. P. de, & Sampaio, N. A. de S. (2023). *Applications of non-parametric testing in a chemical industry Aplicações de testes não paramétricos em uma indústria química*. *14*(8), 14387–14396. https://doi.org/10.7769/gesec.v14i8.2672

[24] Reis, J. S. da M., Cardoso, R. P., Silva, D. E. W., Almeida, M. da G. D. de, Barros, J. G. M. de, Sampaio, N. A. de S., & Barbosa, L. C. F. M. (2023). The Titans Sustainability and Industry 4.0 Working for The Planet Earth. *Revista de Gestão e Secretariado*, *14*(2), 1953–1965. https://doi.org/10.7769/gesec.v14i2.1674

[25] Reis, J. S. da M., Espuny, M., Cardoso, R. P., Sampaio, N. A. de S., Barros, J. G. M. De, Barbosa, L. C. F. M., & Oliveira, O. J. De. (2022). Mapping Sustainability 4.0: contributions and limits of the symbiosis. *Revista de Gestão e Secretariado*, *13*(3), 1426–1438. https://doi.org/10.7769/gesec.v13i3.1417

[26] Reis, J. S. da M., Espuny, M., Cardoso, R. P., Sampaio, N. A. de S., de Barros, J. G. M., Barbosa, L. C. F. M., & Oliveira, O. J. de. (2022). Mapping Sustainability 4 . 0 : contributions and limits of the symbiosis between technology and sustainable development Mapeamento de Sustentabilidade 4 . 0 : contribuições e limites da simbiose entre tecnologia e desenvolvimento sustentável. *Revista de Gestão e Secretariado*, *13*(3), 1426–1438. https://doi.org/10.7769/gesec.v13i3.1417

[27] Reis, J. S. da M., Neto, R. S. P., Espuny, A. L. G., Barros, J. G. M. de, Sampaio, N. A. de S., & Barbosa, L. C. F. M. (2023). New Indicators for Commercial Technical Support Development. *Revista de Gestão e Secretariado*, *14*(5), 8272–8285. https://doi.org/0.7769/gesec.v14i5.2210

[28] Rezende, M. D., Rosa, C. S. da, Cardoso, R. P., Reis, J. S. da M., & Sampaio, N. A. de S. (2023). Statistics as a Tool for Decision Making in Agricultural and Environmental Experiments. *Revista de Gestão e Secretariado*, *14*(4), 5204–5217. https://doi.org/10.7769/gesec.v14i4.1978

[29] Rubert, C. K., De Carvalho, C. P., De Almeida, M. da G. D., De Barros, J. G. M., & Sampaio, N. A. de S. (2023). Development of automotive packaging by applying the QFD method. *Revista de Gestão e Secretariado (Management and Administrative Professional Review)*, *14*(6), 10527–10548. https://doi.org/10.7769/gesec.v14i6.2391

[30] Sales, J. P. De, Salvador, J., Bastos, B., Araujo, A. H. De, Almeida, G. De, & Santos, G. (2021). *Barbosa QUALITY MANAGEMENT IN THE CONTOURS OF CONTINUOUS*. *16*(3), 689–702. https://doi.org/10.24874/ijqr16.03-02

[31] Silva, A. C. P. da, Pasini, V. D., Aguilera, M. V. C., Fonseca, B. B. da, Sampaio, N. A. de S., Reis, J. S. da M., Santos, G., & Barbosa, L. C. F. M. (2023). Mapping the Accidents and Unsafe Conditions of Workers in the Automotive Sector. *Quality Innovation Prosperity*, *27*(2), 139–157. https://doi.org/10.12776/QIP.V27I2.1849

[32] Stüpp, Â. M., Navroski, M. C., Felippe, D., Kniess, D. D. C., Amancio, J. C., Silva, M. A., & Pereira, M. D. O. (2015). Crescimento de mudas de Mimosa scabrella Benth em função de diferentes tamanhos de recipientes e doses de fertilizante. *Revista Ecologia e Nutrição Florestal - ENFLO*, *3*(2). https://doi.org/10.5902/2316980x18613

[33] Yamada, J. T., Viana, R. S. E., Santos, R. R., Carvalho, C. P. de, Almeida, M. da G. D. de, Barros, J. G. M. de, & Sampaio, N. A. de S. (2023). Use of factorial design with significant interaction and Tukey ' s Test in agricultural and environmental experiments Uso de planejamento fatorial com interação significativa e teste de Tukey em experimentos agrícolas e ambientais. *Revista de Gestão e Secretariado*, *14*(6), 9815–9828. https://doi.org/10.7769/gesec.v14i6.2335

Capítulo 12

FotoBiocarregadores Elétricos (FBCE): uma abordagem interdisciplinar entre bioeconomia circular e infraestrutura urbana inteligente

Berenice de Oliveira Bona
Leandro de Oliveira
Adriano Daniel Müller
Leandro Ricardo de Moraes Arisi
Tiago Henrique Bona
Matheus Bona

Resumo: O artigo discorre sobre o projeto FotoBiocarregadores Elétricos (FBCE), uma iniciativa disruptiva que propõe a reconfiguração das infraestruturas urbanas de mobilidade através da convergência entre biotecnologia, inteligência artificial e agricultura familiar. A proposta central consiste na transformação de estações de recarga de veículos elétricos em fotobiorreatores ativos, onde microalgas marinhas realizam o sequestro biológico de CO2 em tempo real, utilizando a casca de arroz — um subproduto da rizicultura orgânica — como insumo nutritivo para o crescimento desses microrganismos. Esse modelo de bioeconomia circular é sustentado pela camada digital de inteligência denominada plataforma OxyVolt, que emprega IoT e Big Data para garantir a rastreabilidade e a validação de créditos de carbono por meio de rigorosos protocolos de Medição, Reporte e Verificação (MRV). Estruturado sob o modelo de Hélice Quádrupla, o projeto integra empresa, academia, tecnologia e cooperativas rurais, promovendo não apenas a mitigação ambiental com uma eficiência de fixação de carbono superior à das florestas terrestres, mas também a inclusão socioeconômica do pequeno produtor e a criação de novos mercados, como os "Eco-outdoors" bioluminescentes. Em suma, o FBCE consolida-se como um manifesto de design regenerativo que une soberania tecnológica e preservação ambiental para conectar produtivamente o campo e as grandes metrópoles.

1. INTRODUÇÃO

A crise climática contemporânea exige uma reconfiguração profunda das infraestruturas urbanas e das cadeias produtivas globais. Embora o setor de transportes seja um dos maiores emissores de gases de efeito estufa (GEE), a transição para a mobilidade elétrica, isoladamente, apresenta limitações se não for acompanhada por estratégias de sequestro ativo de carbono nos centros de consumo (BOUTER et al., 2024). Estudos recentes indicam que, apesar da expansão acelerada da infraestrutura de carregamento de veículos elétricos (IEA, 2024), a neutralidade de carbono nas metrópoles depende da integração de soluções baseadas na natureza (*nature-based solutions*) que atuem *in situ*, transformando pontos de recarga passivos em agentes regenerativos da qualidade do ar urbano.

Neste cenário de urgência e inovação surge o projeto FotoBiocarregadores Elétricos (FBCE), uma iniciativa disruptiva inserida no programa "Cadeias Socioprodutivas da Agricultura Familiar e Sistemas Agroalimentares Sustentáveis". Desenvolvido pela Sismu, com o suporte institucional da FINEP e do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), o FBCE redefine o conceito de eletromobilidade ao propor o uso de fotobiorreatores integrados às estações de recarga. A tese central deste projeto reside na transformação do carregador em uma infraestrutura viva, onde microalgas marinhas, adaptadas ao ambiente urbano, realizam o sequestro biológico de CO2 e a liberação de oxigênio simultaneamente ao abastecimento dos veículos.

A originalidade tecnológica do FBCE é sustentada por um modelo de economia circular que estabelece uma ponte direta entre a agricultura familiar e os centros urbanos. O sistema utiliza a casca de arroz, um subproduto volumoso da rizicultura orgânica, como substrato nutritivo para o cultivo das microalgas. Pesquisas de ponta (SERRANO et al., 2023) comprovam que hidrolisados de casca de arroz são substratos econômicos e eficientes para a biorrefinaria de microalgas, permitindo a produção de biomassa de alto valor agregado com baixo impacto ambiental. Assim, o FBCE não apenas remove carbono da atmosfera, mas também valoriza resíduos agrícolas, criando um novo mercado sustentável para produtores rurais e viabilizando a geração de créditos de carbono (GONG et al., 2024).

2. INTERDISCIPLINARIDADE E INOVAÇÃO: O NEXO BIOECONOMIA-TECNOLOGIA

A fundamentação teórica do projeto FBCE ancora-se no paradigma da Bioeconomia Circular, que propõe a substituição de modelos lineares de produção por ciclos regenerativos de carbono e nutrientes. No contexto do FBCE, a transição metabólica ocorre quando o descarte da agricultura familiar — especificamente a casca de arroz (SiO2 e lignocelulose) — deixa de ser um passivo ambiental no campo para tornar-se um insumo crítico para a biotecnologia urbana. Serrano et al. (2023) demonstram que o pré-tratamento de resíduos lignocelulósicos permite a liberação de açúcares fermentescíveis e nutrientes que potencializam o crescimento mixotrófico de microalgas. Essa integração transforma o ambiente urbano em um polo de biorrefinaria descentralizada, utilizando a biomassa residual da rizicultura para sustentar o sequestro de emissões atmosféricas antropogênicas (GONG et al., 2024).

O conceito de cadeia socioprodutiva transcende a mera logística de suprimentos ao incorporar dimensões de equidade social e preservação ambiental. Sob esta ótica, o produtor rural da agricultura familiar deixa de ser apenas um fornecedor de *commodities*

alimentares para atuar como um provedor de soluções e serviços ambientais (CHEN et al., 2024). A inovação reside na interdisciplinaridade que une a engenharia de software e a inteligência artificial à biotecnologia das algas e ao saber agrícola. Essa simbiose permite que o projeto opere como um catalisador de resiliência climática, onde o monitoramento digital garante a eficiência da captura de CO2 e a saúde dos sistemas biológicos integrados (KUMAR et al., 2024).

3. A CAMADA DE INTELIGÊNCIA E GESTÃO PÚBLICA VIA BIG DATA

A dimensão digital do projeto, fundamentada em arquiteturas de Big Data e Internet das Coisas (IoT), estabelece uma camada de inteligência estratégica indispensável para a governança pública e a transparência das cadeias socioprodutivas. A captura e o processamento de dados em tempo real permitem a construção de indicadores de desempenho ambiental (KPIs) de alta confiabilidade. Segundo Liu et al. (2024), a aplicação de analítica avançada em sistemas de bioeconomia circular fornece aos gestores públicos evidências empíricas para a validação rigorosa de créditos de carbono e o monitoramento do impacto socioeconômico na agricultura familiar.

Essa integração digital garante a rastreabilidade integral da casca de arroz e da biomassa algal, assegurando que a transição para a eletromobilidade seja acompanhada por um controle rigoroso dos serviços ambientais prestados (WANG et al., 2023). A sinergia entre o mundo físico (biotecnologia) e o digital (algoritmos) consolida o projeto como uma solução de Bioeconomia 4.0, alinhada às exigências de escalabilidade e transparência do mercado global.

3.1. A PLATAFORMA OXYVOLT: DESCENTRALIZAÇÃO E PROTOCOLOS MRV

Para materializar essa arquitetura de dados e garantir a escalabilidade do sistema, o ecossistema incorpora a topologia OxyVolt. O OxyVolt não depende de todas as tecnologias estarem fisicamente no ponto de uso; ele funciona como uma rede distribuída de ativos de descarbonização conectados por telemetria avançada. Isso significa que parte da redução ou remoção de CO2 pode vir de unidades externas alocadas estrategicamente, como um tanque fotobiorreator de 10.000L no meio urbano ou propriedades rurais de parceiros operando sistemas de biomassa e captura de carbono.

Neste modelo sistêmico, os ativos ambientais não precisam estar no mesmo local do carregamento ou do consumo de energia. O vetor principal é a rastreabilidade do impacto ambiental gerado por cada unidade. A plataforma OxyVolt consolida esses dados em tempo real via protocolos MRV (Medição, Reporte e Verificação), garantindo o rigor metodológico exigido por auditorias internacionais. Assim, o CO2 evitado ou removido é atribuído ao ecossistema como um todo, permitindo escalar a descarbonização sem a necessidade de replicar fisicamente toda a infraestrutura complexa em cada ponto individual de recarga.

Cada ativo contribui como uma “fonte de impacto” autônoma dentro da mesma malha digital. O resultado é um sistema híbrido de alta eficiência entre distribuição de energia, captura biológica de carbono e geração de dados auditáveis. Esse modelo arquitetural não apenas otimiza a logística urbana, mas cria a base legal e tecnológica indispensável para a certificação de alta integridade e a eventual monetização do impacto ambiental nos mercados voluntário e regulado de carbono.

4. GOVERNANÇA COLABORATIVA: O MODELO DE HÉLICE QUÁDRUPLA

O sucesso e a escalabilidade do projeto FBCE fundamentam-se no modelo de Hélice Quádrupla, articulando diferentes esferas da sociedade (GRUNDEL; DAHLSTRÖM, 2023):

1. Empresa (Sismu): Núcleo gestor responsável pela arquitetura de software, integração de IA e engenharia do hardware.
2. Academia: Provê o rigor científico para validação das cepas de microalgas e a precisão das métricas de sequestro de CO2 (MILLER et al., 2024).
3. Cooperativa (Agricultura Familiar): Fornece a casca de arroz e assegura a inclusão produtiva e o desenvolvimento territorial.
4. Tecnologia: Elo que utiliza Big Data e IoT para conectar a produção rural ao serviço ambiental urbano.

5. FOTOBIORREATORES: TECNOLOGIA E SUSTENTABILIDADE

Os fotobiorreatores contemporâneos implementados no FBCE operam como unidades de refino biológico de alta precisão. O design dos reatores utiliza dinâmica de fluidos computacional (CFD) para otimizar o ciclo luz-escuro, garantindo que a biomassa microalgal atinja altas taxas de fixação de CO2 (KUMAR et al., 2023). A sofisticação reside na capacidade de operar sinergicamente com a infraestrutura de mobilidade elétrica, utilizando sensores inteligentes e algoritmos de aprendizado de máquina para o monitoramento em tempo real de pH, temperatura e níveis de irradiância (ZHANG et al., 2024).

O paradigma da "Cidade Viva" materializa-se quando tecnologias de sequestro biológico são incorporadas ao design funcional de equipamentos públicos. A utilização de materiais avançados com propriedades ópticas otimizadas permite a penetração da radiação fotossinteticamente ativa (PAR), mesmo em condições de baixa luminosidade urbana (MORAES et al., 2023).

6. MECANISMOS DE FIXAÇÃO DE CARBONO E ECONOMIA CIRCULAR

A eficiência biológica do sistema fundamenta-se na otimização da atividade da enzima RuBisCO, catalisando a fixação do CO2 inorgânico em moléculas orgânicas. Operado em regime de fluxo contínuo e sob condições controladas de mixotrofia, o sistema potencializa a captura de carbono ao utilizar resíduos de biomassa lignocelulósica como fonte estável de carbono orgânico suplementar (GAO et al., 2024).

Ao utilizar resíduos abundantes, como a casca de arroz, para nutrir as culturas de microalgas, estabelece-se um modelo de bioeconomia descentralizada. Oliveira e Silva (2023) demonstram que a valorização da biomassa residual gerada — conversível em biocombustíveis ou biofertilizantes — cria um fluxo de valor que retroalimenta o sistema. Além disso, o uso de nanomateriais pode elevar a eficiência de conversão fotônica em até 40% (TAN et al., 2025), consolidando o FBCE como uma tecnologia de ruptura.

7. IMPACTOS NA SUSTENTABILIDADE E RESPONSABILIDADE SOCIOAMBIENTAL

A implementação do FBCE é analisada através de três dimensões:

1. Ambiental: Atua como uma "floresta líquida", com taxas de fixação de carbono até 50 vezes superiores às árvores terrestres em espaços reduzidos (SILVA et al., 2025). Melhora a qualidade do ar local através da biofiltragem de particulados (SANTOS; YANG, 2025).
2. Social: Promove a justiça climática ao integrar pequenos produtores no mercado de serviços ambientais e créditos de carbono (OLIVEIRA et al., 2025; MORAES et al., 2025).
3. Econômica: Catalisa empregos verdes e inaugura verticais inovadoras, como os Eco-outdoors.

7.1. ECO-OUTDOORS: CONVERGÊNCIA ENTRE COMUNICAÇÃO E BIOECONOMIA

Os Eco-outdoors representam uma ruptura com a mídia externa tradicional. Utilizam a pigmentação natural ou bioluminescência das microalgas para sinalização, reduzindo o consumo de energia (LEE et al., 2025). Este modelo de Mídia Regenerativa permite que marcas invistam na manutenção da infraestrutura verde, gerando receita que pode subsidiar o custo da recarga ou a remuneração do agricultor (MARTINEZ; WEBER, 2025).

8. DESAFIOS E PERSPECTIVAS FUTURAS

A transição para escala industrial impõe desafios críticos. O estresse metabólico causado por poluentes urbanos (NOx e SO2) exige o desenvolvimento de sistemas de pré-filtragem biológica e seleção de cepas extremófilas (PARK et al., 2025). Além disso, a alta concentração de sílica na casca de arroz requer investigações sobre co-suplementação para garantir a biodisponibilidade de nutrientes (ZHANG; MÜLLER, 2025).

A logística de carbono também deve ser otimizada para manter a pegada negativa, minimizando a distância entre a agricultura familiar e os pontos de uso (LOPEZ et al., 2025). Superadas essas barreiras, o FBCE consolida-se como o primeiro modelo replicável de infraestrutura urbana viva.

9. CONCLUSÃO

O projeto FBCE transcende a funcionalidade técnica para consolidar-se como um manifesto de design regenerativo. A pesquisa evidencia que o desenvolvimento sustentável prospera na intersecção entre a agrobiodiversidade rural e a tecnologia urbana. O projeto alinha-se diretamente aos ODS 7, 9, 11 e 12 da ONU, demonstrando que a soberania tecnológica e a preservação ambiental são indissociáveis. Ao unir inteligência digital, biotecnologia e saber tradicional, o FBCE entrega uma infraestrutura viva capaz de reconectar produtivamente o campo e a cidade.

REFERÊNCIAS

[1] BOUTER, A. et al. A comprehensive well-to-wheel assessment of different powertrain-fuel combinations focusing on climate change indicators. **Journal of Cleaner Production**, v. 430, 2024.

[2] CHEN, J. et al. Circular economy in agriculture: Utilizing crop residues for sustainable bioproducts and carbon sequestration in smart cities. **Sustainable Cities and Society**, v. 102, 2024.

[3] GAO, F. et al. Mixotrophic cultivation of microalgae for enhanced carbon sequestration and waste valorization: A circular economy approach. **Bioresource Technology**, v. 391, p. 129910, 2024.

[4] GONG, Y. et al. Microalgae-based carbon capture and utilization in urban environments: A review of technological integration and economic viability. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 189, 2024.

[5] GRUNDEL, I.; DAHLSTRÖM, M. The quadruple helix model in regional innovation systems: Policy and practice for sustainable transitions. **Journal of Cleaner Production**, v. 410, 2023.

[6] IEA. **Global EV Outlook 2024**: Catching up with climate goals. Paris: International Energy Agency, 2024.

[7] KUMAR, A. et al. Advanced photobioreactor designs for microalgae cultivation: A review on recent technological upgrades. **Bioresource Technology**, v. 370, p. 128524, 2023.

[8] KUMAR, M. et al. Integrating agricultural by-products into the circular bioeconomy: Advances in bioprocessing and ecosystem services. **Journal of Cleaner Production**, v. 435, 2024.

[9] LEE, S. et al. Bioluminescent microalgae for sustainable urban lighting and carbon sequestration: A techno-economic analysis. **Applied Energy**, v. 358, p. 112-126, 2025.

[10] LIU, Z. et al. Big Data analytics for the transition to a circular bioeconomy: A systematic review and future research agenda. **Journal of Cleaner Production**, v. 434, 2024.

[11] LOPEZ, A. et al. The future of living urban infrastructure: Scaling bio-integrated designs in smart cities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 204, 2025.

[12] MARTINEZ, P.; WEBER, J. Regenerative Media: Integrating ecosystem services into out-of-home advertising models. **Journal of Cleaner Production**, v. 460, p. 89-103, 2025.

[13] MILLER, R. et al. Collaborative governance in the circular bioeconomy: Integrating quadruple helix actors for carbon neutrality. **Sustainable Cities and Society**, v. 105, 2024.

[14] MILLER, S.; ROSSI, G. Breaking Silos: Cross-sectoral innovation in the circular bioeconomy. **Journal of Cleaner Production**, v. 465, p. 112-126, 2025.

[15] MORAES, G. et al. Carbon credit protocols for family farming: Integrating crop residues into urban bioeconomy. **Land Use Policy**, v. 148, p. 106-120, 2025.

[16] MORAES, L. et al. Optical properties and light distribution optimization in closed photobioreactors for urban carbon capture. **Journal of Cleaner Production**, v. 412, p. 137450, 2023.

[17] OLIVEIRA, R. et al. Socioproductive chains and the valorization of agricultural waste: A new era for smallholder farmers. **Journal of Rural Studies**, v. 113, p. 45-59, 2025.

[18] OLIVEIRA, R.; SILVA, M. Circular bioeconomy and electric mobility: The role of microalgae in sustainable urban transitions. **Journal of Environmental Management**, v. 345, p. 118542, 2023.

[19] PARK, J. et al. Metabolic resilience of marine microalgae under urban atmospheric stress: Challenges for in-situ carbon capture. **Nature Sustainability**, v. 8, n. 2, 2025.

[20] SERRANO, A. et al. A novel rice hull-microalgal biorefinery for the production of natural phenolic compounds and bioenergy. **Bioresource Technology**, v. 387, 2023.

[21] TAN, J. et al. Nanomaterials for light management in photobioreactors: Next-generation carbon capture technology. **Nature Sustainability**, v. 8, n. 2, p. 112-125, 2025.

[22] WANG, H. et al. IoT-enabled environmental monitoring for smart city governance: From data to sustainable public policies. **Sustainable Cities and Society**, v. 98, 2023.

[23] WANG, L. et al. Life cycle assessment of integrated microalgae-based carbon capture and EV

charging stations. **Energy Conversion and Management**, v. 302, p. 118120, 2024.

[24] ZHANG, L.; MÜLLER, H. Nutritional limitations of lignocellulosic residues in microalgal cultivation: A techno-economic review. **Energy Conversion and Management**, v. 310, 2025.

[25] ZHANG, X. et al. Artificial intelligence and machine learning applications in microalgae-based wastewater treatment and carbon capture: A comprehensive review. **Water Research**, v. 248, p. 120890, 2024.

Capítulo 13

A logística como diferencial competitivo na cadeia de suprimentos da Zona Franca de Manaus

Rayssa Valente Simão
Giskele Luz Rafael

Resumo: Objetivo: Investigar como a logística pode melhorar a competitividade da cadeia de suprimentos na Zona Franca de Manaus, considerando os desafios estruturais, geográficos e operacionais da região amazônica. Métodos: Realizar um estudo bibliográfico por meio da análise de livros, artigos científicos e demais produções acadêmicas relacionadas à logística, cadeia de suprimentos e desenvolvimento regional, com enfoque no Polo Industrial de Manaus e nos impactos logísticos sobre a competitividade empresarial. Resultados: Os resultados demonstraram que a logística exerce influência direta sobre os custos operacionais, os prazos de entrega e a eficiência na distribuição de produtos das empresas instaladas na Zona Franca de Manaus. Evidenciou-se que as limitações de infraestrutura, a dependência do transporte hidroviário e a distância dos grandes centros consumidores representam desafios significativos para a cadeia de suprimentos regional. Observou-se ainda que a utilização integrada de diferentes modais de transporte e a cooperação entre empresas contribuem para a redução de riscos operacionais e para o aumento da eficiência logística. Conclusão: Conclui-se que a logística constitui um diferencial competitivo fundamental para a sustentabilidade econômica do Polo Industrial de Manaus. Contudo, persistem limitações estruturais e geográficas que exigem estratégias logísticas mais integradas e adaptadas às especificidades da região amazônica.

Palavras-chave: Logística, Cadeia de suprimentos, Zona Franca de Manaus.

1. INTRODUÇÃO

A logística tem se tornado cada vez mais importante no ambiente empresarial atual, especialmente em situações que envolvem alta complexidade geográfica e operacional. Em um mercado globalizado e competitivo, uma gestão eficaz da cadeia de suprimentos se revela crucial para cortar custos, aprimorar a qualidade dos serviços e elevar a competitividade das empresas. Assim, a logística transcende suas funções convencionais de transporte e armazenamento, integrando-se a diversas estratégias que agregam valor tanto para as organizações quanto para as comunidades em que estão inseridas.

Um exemplo importante da conexão entre logística e desenvolvimento regional no Brasil é a Zona Franca de Manaus, situada na cidade de Manaus. Estabelecida em 1967 como uma iniciativa do governo para integrar economicamente a Amazônia ao restante do país, essa zona se transformou em um dos principais polos industriais brasileiros. Atualmente, o Polo Industrial de Manaus é lar de várias empresas, tanto nacionais quanto internacionais, destacando-se nas áreas de eletrônicos, motocicletas, tecnologia da informação e bens de consumo. No processo industrial desempenha um papel vital na economia da região, criando milhares de empregos diretos e indiretos e impulsionando o crescimento econômico do Norte do Brasil.

Apesar da importância econômica do modelo, a localização da Zona Franca de Manaus apresenta desafios logísticos significativos. A Amazônia possui características territoriais e ambientais únicas que afetam diretamente a circulação de produtos e insumos industriais. A maior parte do transporte na região é realizada por hidrovias, enquanto as rodovias enfrentam problemas de infraestrutura e grandes distâncias em relação aos principais mercados consumidores, situados nas regiões Sul e Sudeste do país. Como resultado, as empresas do Polo Industrial costumam enfrentar prazos logísticos mais longos e custos de transporte mais altos em comparação com outros centros industriais do Brasil.

Para além das dificuldades relacionadas à infraestrutura e à posição geográfica, os aspectos ambientais têm um papel significativo na logística dessa área. Fenômenos climáticos, como períodos prolongados de seca ou variações nos níveis dos rios da Amazônia, podem impactar o transporte hidroviário e resultar em consequências na circulação de produtos. Esses aspectos destacam que a logística na Amazônia abrange não apenas desafios operacionais, mas também fatores naturais que exigem planejamento e ajustes por parte das empresas e dos setores governamentais.

Entender como se dá a logística na Zona Franca de Manaus é fundamental para avaliar a competitividade das empresas localizadas nessa área. A maneira como as organizações configuram suas cadeias de fornecimento, administram estoques, planejam o transporte e lidam com desafios logísticos pode impactar consideravelmente sua eficiência operacional e sua habilidade de competir tanto no mercado nacional quanto internacional. Deste modo, a logística desempenha uma função estratégica na preservação da viabilidade econômica do Polo Industrial de Manaus.

A opção por investigar a Zona Franca de Manaus neste estudo é fundamentada na peculiaridade de seu sistema logístico. Ao contrário de outros centros industriais brasileiros, que contam com uma infraestrutura rodoviária e ferroviária desenvolvida, na Amazônia a logística é predominantemente baseada na combinação dos modais fluvial, aéreo e rodoviário. Essa característica gera um cenário cheio de desafios e oportunidades para a administração da cadeia de suprimentos, destacando a importância do tema tanto no contexto acadêmico quanto prático.

Assim, a pesquisa foca na seguinte questão: como a logística pode melhorar a competitividade da cadeia de fornecimento na Zona Franca de Manaus?

Este estudo busca o entendimento dos desafios logísticos enfrentados pelas companhias situadas na Zona Franca de Manaus, ao mesmo tempo em que ressalta a importância da logística como um elemento-chave para o desenvolvimento econômico e industrial da região.

Dessa forma, a presente pesquisa busca investigar como a logística pode melhorar a competitividade da cadeia de suprimentos na Zona Franca de Manaus, levando em conta as adversidades relacionadas à estrutura, à geografia e às operações locais. Para atingir esse propósito, os objetivos específicos incluem: compreender os conceitos de logística e cadeia de suprimentos, examinar as principais atividades logísticas relacionadas ao transporte, armazenamento e controle de estoques no contexto da Zona Franca de Manaus e identificar os desafios logísticos significativos enfrentados na região, levando em conta fatores estruturais, modais e ambientais.

2. MÉTODOS

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa de abordagem qualitativa, desenvolvida por meio de revisão bibliográfica, com o propósito de analisar a logística como diferencial competitivo na cadeia de suprimentos da Zona Franca de Manaus. Quanto aos fins, a pesquisa possui caráter descritivo e explicativo, uma vez que busca apresentar os principais conceitos relacionados à logística e à gestão da cadeia de suprimentos, bem como compreender de que forma esses elementos influenciam a competitividade empresarial no contexto amazônico.

Quanto aos meios, trata-se de uma pesquisa bibliográfica, fundamentada em materiais já publicados, incluindo livros, artigos científicos, periódicos e demais produções acadêmicas relacionadas à logística, cadeia de suprimentos e competitividade organizacional. As fontes de dados foram obtidas em bases digitais e bibliotecas virtuais especializadas, utilizando descritores como “logística estratégica”, “cadeia de suprimentos”, “competitividade” e “Zona Franca de Manaus”.

Por se tratar de um estudo de natureza bibliográfica, não houve população estudada, amostragem ou aplicação de critérios de seleção envolvendo seres humanos ou animais. Os critérios de inclusão consideraram publicações pertinentes à temática da logística e da gestão da cadeia de suprimentos, priorizando materiais científicos com relevância teórica e relação direta com o contexto da Zona Franca de Manaus.

Os procedimentos analíticos consistiram na leitura, seleção, organização e análise crítica das informações coletadas, possibilitando a construção do referencial teórico e a interpretação dos principais desafios logísticos enfrentados pelas empresas da região. As informações foram sistematizadas de forma a relacionar os fundamentos conceituais da logística com os impactos sobre a competitividade empresarial.

Em relação às questões éticas, por se tratar de uma pesquisa exclusivamente bibliográfica, sem envolvimento direto com seres humanos ou animais, não houve necessidade de submissão ao Comitê de Ética em Pesquisa. Entretanto, foram respeitados os princípios éticos relacionados à autoria, confiabilidade e integridade das fontes utilizadas.

3. RESULTADOS

A análise dos dados obtidos por meio da pesquisa bibliográfica destacou diversos fatores que influi diretamente na eficácia logística e na competitividade das empresas localizadas na Zona Franca de Manaus. Os resultados indicam que a logística tem um papel essencial na atividade do setor industrial, uma vez que o transporte de insumos e produtos está vinculado a sistemas de deslocamento complexos, os quais são fortemente influenciados pelas características geográficas da região amazônica.

De acordo com dados fornecidos pela Superintendência da Zona Franca de Manaus, o Polo Industrial de Manaus abriga mais de 500 indústrias e gera mais de 100 mil empregos diretos, além de criar centenas de milhares de vagas indiretas. O faturamento anual dessa área ultrapassa R$ 170 bilhões, evidenciando sua importância econômica tanto para a região Norte quanto para o Brasil como um todo. Contudo, mesmo com sua relevância econômica, as empresas instaladas no polo enfrentam grandes desafios logísticos, principalmente relacionados ao transporte, à distância dos principais centros de consumo e às condições naturais da Amazônia.

Um dos achados mais relevantes na literatura refere-se à grande dependência do transporte fluvial para a circulação de mercadorias. A maior parte dos insumos necessários à indústria é encaminhada a Manaus por meio de portos situados na região Norte e, posteriormente, é transportada pelos rios amazônicos. Embora o transporte aquático apresente custos menores por unidade, ele está diretamente ligado às condições ambientais, como o nível das águas dos rios e as variações climáticas que acontecem ao longo das diferentes estações.

Pesquisas recentes demonstram que eventos climáticos extremos estão influenciando de maneira significativa a logística em âmbito regional. Durante períodos de secas severas na Amazônia, por exemplo, os níveis dos rios diminuem consideravelmente, dificultando a navegação de grandes embarcações. Essa situação provoca atrasos na entrega de matérias-primas industriais, podendo impactar diretamente a eficiência das empresas. Nesse cenário, estudos como o de Brito e Lemos (2025) apontam que as mudanças climáticas têm agravado os desafios logísticos na área, exigindo das empresas e das organizações responsáveis pela infraestrutura de transporte uma melhor organização e adaptação.

Outro ponto que foi notado refere-se à insuficiente conexão entre os diferentes modais logísticos disponíveis. Embora a região conte com transporte fluvial, rodoviário e aéreo, a ausência de infraestrutura adequada inviabiliza uma integração eficiente desses sistemas. Consoante a Santos (2025), a deficiência de uma rede logística completamente integrada aumenta os custos operacionais das empresas e reduz a competitividade do Polo Industrial de Manaus em relação a outros centros industriais do Brasil.

Além dos fatores estruturais e ambientais, as informações indicam que os desafios logísticos na área estão profundamente conectados aos riscos financeiros que as organizações enfrentam. De acordo com Dos Santos Xavier et al. (2025), atrasos na entrega de mercadorias, variações nos custos de transporte e dificuldades na cadeia de suprimentos podem resultar em sérias consequências financeiras para as empresas situadas na Zona Franca de Manaus. Dessa forma, a logística se transforma em um ponto não apenas operacional, mas essencial para a estabilidade financeira das companhias.

4. DISCUSSÃO

A logística, no âmbito da administração da cadeia de suprimentos, refere-se ao conjunto de ações relacionadas ao planejamento, à implementação e ao monitoramento dos fluxos de materiais, informações e recursos financeiros que vão desde os fornecedores até os consumidores finais. De acordo com Soares (2015), embora muitas vezes considerados como sinônimos, logística e gestão da cadeia de suprimentos apresentam diferenças significativas: a logística concentra-se nas operações de transporte, armazenamento, controle de estoques e processamento de pedidos, enquanto a gestão da cadeia de suprimentos adota uma perspectiva mais ampla e estratégica, englobando diversos processos, organizações e interações empresariais. A logística é um elemento crucial nesse sistema, facilitando sua operacionalização e assegurando A partir da análise da literatura, foi possível sistematizar os principais desafios logísticos identificados no contexto da Zona Franca de Manaus, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Principais desafios logísticos da Zona Franca de Manaus

Desafio logístico	Características	Impactos na cadeia de suprimentos
Distância geográfica dos mercados consumidores	A região Norte está distante dos principais centros industriais do Brasil (Sudeste e Sul)	Aumento do tempo de transporte e elevação dos custos logísticos
Dependência do transporte fluvial	Grande parte das mercadorias depende das hidrovias amazônicas	Vulnerabilidade a variações no nível dos rios e eventos climáticos
Infraestrutura logística limitada	Rodovias e sistemas intermodais ainda apresentam limitações estruturais	Dificuldades na integração entre modais de transporte
Custos elevados de frete	Transporte de longa distância e menor escala logística	Redução da competitividade das empresas
Eventos climáticos extremos	Secas severas e alterações no nível dos rios	Interrupções no fluxo de mercadorias e atrasos na produção

Fonte: Elaborado pela autora com base em Santos E Junior (2025); Dos Santos Xavier et al. (2025); Brito e Lemos (2025).

A análise desses aspectos demonstra que os desafios logísticos enfrentados pelas empresas da Zona Franca de Manaus são intricados e envolvem várias dimensões, incluindo estrutura, geografia, meio ambiente e economia. No entanto, os estudos examinados sugerem que uma administração logística eficaz pode se transformar em um elemento significativo de vantagem competitiva.

Entre as principais táticas logísticas utilizadas pelas organizações do Polo Industrial de Manaus, destacam-se a preparação antecipada do fornecimento de insumos, a introdução de sistemas integrados de gestão logística e a utilização de técnicas mais eficientes para o controle de estoques. Essas práticas contribuem para reduzir os riscos de atrasos nas entregas e garantem uma maior consistência na produção industrial.

Um ponto importante mencionado na pesquisa trata da importância da cooperação entre empresas, fornecedores e operadores de logística. A interação entre os vários agentes da cadeia de suprimentos favorece uma coordenação mais eficaz no transporte de mercadorias e contribui para a redução dos custos operacionais. Nesse contexto, a

logística colaborativa se destaca como uma alternativa crucial para otimizar a eficiência da cadeia de suprimentos na região.

Os resultados mostraramque, apesar das restrições estruturais e dos desafios ambientais típicos da Zona Franca de Manaus, a logística desempenha um papel fundamental que está intimamente ligado ao aumento da competitividade das empresas localizadas no Polo Industrial. Isso se deve ao fato de que a implementação de estratégias logísticas eficazes, como a otimização do transporte multimodal, a diminuição de custos operacionais, o planejamento adequado de estoques e a aprimoração na administração da cadeia de suprimentos, contribui para reduzir os efeitos do isolamento geográfico e elevar a eficiência na produção.

A logística não só torna possível a realização das operações industriais, como também desempenha um papel crucial na competitividade das empresas nos âmbitos nacional e internacional. Diante disso, é possível afirmar que uma logística eficiente aprimora a competitividade ao diminuir custos, acelerar os prazos de entrega e elevar a qualidade do atendimento, solidificando sua importância como fator chave para a sustentabilidade econômica e a preservação do modelo de desenvolvimento regional simbolizado pela Zona Franca de Manaus.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os principais achados ao longo do desenvolvimento desta pesquisa são os entraves logísticos não apenas impactam os custos operacionais, mas também influenciam diretamente o nível de serviço e a capacidade competitiva das empresas. Por outro lado, foi evidenciado também que práticas como a integração entre modais de transporte, o uso de tecnologias para gestão da cadeia de suprimentos, o planejamento estratégico de estoques e a cooperação entre empresas e instituições podem reduzir significativamente esses impactos. Ressalta-se a necessidade de investimentos em infraestrutura e políticas públicas voltadas à logística regional mostrou-se um fator essencial para o fortalecimento do modelo econômico da Zona Franca. A partir do exposto este trabalho apresenta a contribuição que reforça a importância da logística como elemento estratégico para o desenvolvimento econômico regional, oferecendo uma análise direcionada à realidade amazônica, que pode subsidiar tanto decisões empresariais quanto a formulação de políticas públicas. O estudo também amplia a discussão acadêmica ao relacionar competitividade e logística em um contexto marcado por desafios geográficos singulares.

REFERÊNCIAS

[1] BOWERSOX, Donald J. et al. **Gestão logística da cadeia de suprimentos**. AMGH Editora, 2013.

[2] BRITO, Victória Holanda de; LEMOS, Maria Fernanda. Impacto da mudança climática na amazônia: estudo de caso das secas extremas em Manaus, seus efeitos e desafios na logística urbana. 2025.

[3] FARIAS, Ana Cristina Pinto Mathias et al. GESTÃO DA CADEIA DE SUPRIMENTOS: COMPETITIVIDADE, DESAFIOS E PERSPECTIVAS CONTEMPORÂNEAS. **Revista Tópicos**, v. 3, n. 26, p. 1-14, 2025.

[4] SANTOS XAVIER, Patrícia et al. Gerenciamento de riscos financeiros em empresas da Zona Franca de Manaus: um estudo sobre os principais desafios. **INTERFERENCE: A JOURNAL OF AUDIO CULTURE**, v. 11, n. 2, p. 1383-1406, 2025.

[5] SANTOS, Natasha Pessoa; JUNIOR, Ali Antônio Abrão. Integração Logística e Infraestrutura na Zona Franca de Manaus. **Revista do Encontro de Gestão e Tecnologia**, v. 2, n. 4, p. e24012-e24012, 2025.

[6] SILVA SIQUEIRA, Rayanna et al. Gestão da cadeia de suprimentos: desafios e benefícios. **Revista Tópicos**, v. 2, n. 6, p. 1-16, 2024.

[7] SILVA, Danilo Luiz. LOGÍSTICA ESTRATÉGICA: INTEGRAÇÃO DA CADEIA DE SUPRIMENTOS E INDICADORES DE DESEMPENHO. **Revista Jurídica do Nordeste Mineiro**, v. 2, n. 01, p. 1-17, 2026.

[8] SOARES, Leandro. Logística e gestão da cadeia de suprimentos: conceitos e diferenças. **Cadernos UNISUAM de Pesquisa e Extensão**, v. 5, n. 4, p. 46-53, 2015.

Capítulo 14

Mapeamento do fluxo de valor como ferramenta estratégica de melhoria contínua

Henrique Guizellini Pinto
Felipe Segateli Irikawa
Daniel Mantovani
Juliana Verga Shirabayashi
Marco Aurélio Reis dos Santos
Rafael Germano Dal Molin Filho

Resumo: A crescente competitividade do setor industrial exige das organizações a adoção de ferramentas capazes de identificar desperdícios, aumentar a eficiência operacional e promover a melhoria contínua dos processos produtivos. Nesse contexto, o Mapeamento do Fluxo de Valor (*Value Stream Mapping – VSM*), fundamentado nos princípios da Produção Enxuta (*Lean Manufacturing*), destaca-se como uma ferramenta estratégica para a visualização integrada do fluxo de materiais e informações, possibilitando a identificação de atividades que agregam e não agregam valor ao produto. Este estudo apresentou uma experiência de aplicação do *VSM* em um processo produtivo industrial com o objetivo de diagnosticar ineficiências, identificar oportunidades de melhoria e propor um fluxo de produção mais eficiente. A metodologia compreendeu a coleta de dados operacionais em campo, o mapeamento do estado atual do processo, a análise crítica dos gargalos e desperdícios identificados, bem como a elaboração do mapa de estado futuro, fundamentado em princípios da manufatura enxuta. Os resultados prospectados evidenciam possíveis melhorias expressivas no desempenho do processo analisado, destacando-se a redução do Lead Time de 14,2 dias para 0,3 dia, a eliminação total do estoque em processo (*Work in Process – WIP*) anteriormente acumulado e o balanceamento das operações em conformidade com o *Takt Time* mensal. Além disso, as propostas desenvolvidas contribuem para a melhoria do fluxo produtivo, a redução de desperdícios, o aumento da capacidade de resposta às demandas dos clientes e a utilização mais eficiente dos recursos produtivos. Os resultados demonstram o potencial do *VSM* como uma ferramenta estratégica para apoiar iniciativas de melhoria contínua e elevar o desempenho operacional em ambientes industriais.

Palavras-chave: Eficiência produtiva, Value Stream Mapping, Melhoria contínua, Processos industriais.

1. INTRODUÇÃO

O ambiente industrial contemporâneo é marcado por elevados níveis de competitividade, exigindo das organizações maior eficiência na utilização de recursos, redução de custos e melhoria contínua de seus processos produtivos. Nesse contexto, a gestão de operações passou a assumir papel estratégico, sendo fundamental para o alcance de melhores níveis de desempenho e vantagem competitiva (Corrêa e Corrêa, 2017).

Os processos produtivos industriais, em geral, apresentam elevada complexidade, envolvendo múltiplas etapas interdependentes que demandam integração eficiente de recursos, controle operacional e qualidade. Diante disso, torna-se essencial a adoção de práticas estruturadas que possibilitem a identificação e eliminação de desperdícios, contribuindo para o aumento da produtividade e eficiência organizacional (Krüger, 2015).

Nesse cenário, destacam-se os conceitos do *Lean Manufacturing*, cuja abordagem é voltada à maximização do valor entregue ao cliente por meio da eliminação de atividades que não agregam valor ao processo produtivo (Santos e Damy-Benedetti, 2022). Como ferramenta dessa filosofia, o Mapeamento do Fluxo de Valor (*Value Stream Mapping – VSM*) permite a visualização integrada do fluxo de materiais e informações, facilitando a identificação de gargalos, tempos de espera e ineficiências ao longo da produção.

Além disso, a gestão eficiente do fluxo produtivo está diretamente relacionada ao Planejamento e Controle da Produção (PCP), que organiza e estrutura as atividades produtivas, contribuindo para o melhor aproveitamento dos recursos disponíveis e para o alcance dos objetivos organizacionais (Chiavenato, 2022).

Diante desse contexto, este projeto teve como objetivo analisar o Mapeamento do Fluxo de Valor em um processo produtivo industrial, com foco na identificação de desperdícios e na proposição de melhorias voltadas ao aumento da eficiência operacional e ao melhor alinhamento entre capacidade produtiva e demanda.

1.1. GESTÃO DA PRODUÇÃO E OPERAÇÕES (GPO)

A Gestão da Produção e Operações (GPO) é responsável pelo gerenciamento estratégico dos recursos produtivos, visando transformar insumos em bens ou serviços que atendam às necessidades dos clientes em termos de qualidade, custo e prazo (Corrêa e Corrêa, 2017).

Ao longo das últimas décadas, a GPO passou de uma abordagem operacional para um papel estratégico dentro das organizações, contribuindo diretamente para a competitividade empresarial. Segundo Pereira et al. (2015), a área de produção e operações possui caráter interdisciplinar, exigindo alinhamento com outras áreas organizacionais, como logística, qualidade e planejamento.

De acordo com Martins e Laugeni (2006), a produção pode ser entendida como o conjunto de atividades responsáveis por agregar valor aos produtos, sendo fundamental que essas atividades ocorram de forma eficiente e integrada. Nesse sentido, a gestão eficaz da produção depende da coordenação adequada de recursos como mão de obra, máquinas, materiais e informações.

Além disso, Corrêa e Corrêa (2017) destacam que a evolução da produção industrial, desde a manufatura artesanal até os sistemas automatizados, reforça a importância de métodos estruturados de gestão para garantir eficiência, padronização e qualidade nos processos produtivos.

No processo de gestão, o Planejamento e Controle da Produção (PCP) desempenha papel fundamental na organização das atividades produtivas, sendo responsável por coordenar recursos, definir prioridades e garantir o atendimento à demanda.

Segundo Chiavenato (2022), o PCP assegura que a produção ocorra de forma planejada e estruturada, evitando improvisações e promovendo maior eficiência operacional. Sua atuação envolve atividades como programação da produção, controle de estoques e gestão do fluxo de materiais.

De acordo com Araújo et al. (2018), o PCP define o que produzir, quanto produzir, quando produzir, como produzir e quem será responsável pela execução, sendo essencial para o alinhamento entre capacidade produtiva e demanda do mercado.

Além disso, o PCP atua como elo entre o planejamento estratégico e a execução operacional, contribuindo para a tomada de decisões mais assertivas. Ramos et al. (2019) destacam que uma gestão eficiente do fluxo de materiais permite a otimização dos custos e a melhoria do desempenho produtivo.

1.2. A PRODUÇÃO ENXUTA

A Produção Enxuta, ou Lean Manufacturing, é uma filosofia de gestão originada no Sistema Toyota de Produção, cujo principal objetivo é a eliminação de desperdícios e a maximização do valor entregue ao cliente (Ohno, 1997). Segundo Womack e Jones (2004), o Lean baseia-se em cinco princípios fundamentais:

1. Definição de valor sob a ótica do cliente;
2. Identificação da cadeia de valor;
3. Criação de fluxo contínuo;
4. Implementação de produção puxada;
5. Busca pela perfeição.

Esses princípios orientam a melhoria contínua dos processos produtivos, promovendo maior eficiência e redução de custos. De acordo com Slack et al. (2013), a identificação de desperdícios é o primeiro passo para a melhoria dos processos. Os desperdícios podem ser classificados em categorias como superprodução, espera, transporte, excesso de processamento, estoques, movimentação e defeitos.

Além disso, o Lean envolve a aplicação de diversas ferramentas que auxiliam na melhoria contínua, como:

- 5S, voltado à organização e padronização do ambiente;
- Kanban, utilizado para controle da produção e fluxo de materiais;
- Kaizen, baseado na melhoria contínua;
- TPM, focado na manutenção produtiva total.

Segundo Werkema (2011), a aplicação integrada dessas ferramentas contribui para a redução de desperdícios e aumento da produtividade.

1.3. MAPEAMENTO DO FLUXO DE VALOR (VSM)

O Mapeamento do Fluxo de Valor é uma ferramenta visual utilizada para representar o fluxo de materiais e informações ao longo de um processo produtivo.

De acordo com Rother e Shook (2003), o *VSM* permite visualizar de forma integrada todas as etapas do processo, identificando atividades que agregam valor e aquelas que representam desperdícios. Essa visão sistêmica é fundamental para a análise e melhoria dos processos produtivos.

Segundo Werkema (2011), o *VSM* utiliza símbolos padronizados para representar processos, estoques, fluxos de informação e outros elementos do sistema produtivo, facilitando a comunicação e compreensão entre os envolvidos.

Além disso, Singh et al. (2010) destacam que o *VSM* permite identificar gargalos, tempos de espera e ineficiências, contribuindo para a proposição de melhorias com base em dados concretos.

A aplicação do *VSM* segue etapas estruturadas que garantem a efetividade da análise. Inicialmente, define-se o produto ou família de produtos a ser analisada. Em seguida, realiza-se o mapeamento do estado atual, com coleta de dados diretamente no chão de fábrica, incluindo tempos de ciclo, tempos de espera e níveis de estoque. Após a análise do estado atual, é elaborado o mapa de estado futuro, no qual são propostas melhorias voltadas à eliminação de desperdícios e à criação de um fluxo produtivo mais eficiente (Rother e Shook, 2003).

Entre os principais benefícios da aplicação do *VSM*, destacam-se:

- Identificação de gargalos e desperdícios;
- Redução do lead time;
- Melhoria do fluxo produtivo;
- Aumento da eficiência operacional;
- Apoio à tomada de decisão baseada em dados.

Dessa forma, o *VSM* se consolida como uma ferramenta essencial para a melhoria contínua de processos produtivos, sendo amplamente utilizado em ambientes industriais que buscam maior competitividade.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO PRODUTIVO

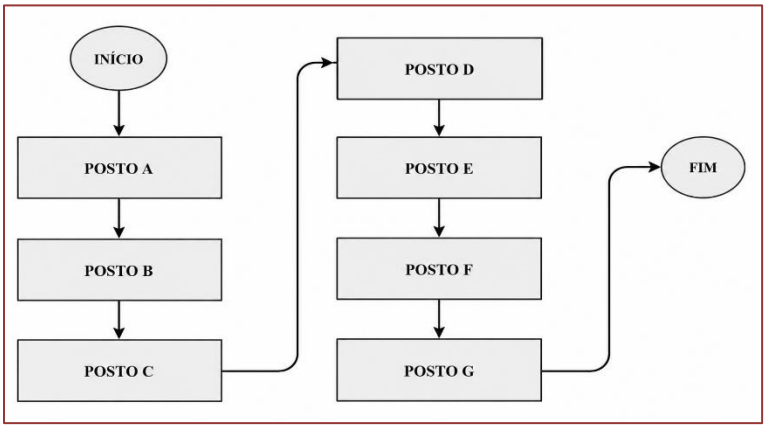
O estudo foi realizado em um ambiente industrial de grande porte, pertencente ao setor de manufatura, caracterizado por processos produtivos complexos e elevada integração entre diferentes etapas operacionais. A unidade analisada apresenta estrutura organizacional consolidada, com divisão clara de responsabilidades e atuação em diferentes mercados.

O processo produtivo estudado envolve a fabricação de equipamentos industriais, sendo composto por múltiplas etapas interdependentes. Para fins de análise, foi selecionada uma etapa específica do processo, composta por sete postos de trabalho, organizados sequencialmente e identificados de forma genérica.

A etapa estudada corresponde a uma fase específica da produção, na qual ocorre a montagem e integração de componentes essenciais ao funcionamento do produto.

O fluxo produtivo é composto por sete postos de trabalho (A até o G), conforme a Figura 1, nos quais as atividades são executadas de forma sequencial.

Figura 1 – Fluxograma do Processo Produtivo Analisado.



Fonte: Autores (2026).

2.2. PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

A aplicação do *VSM* foi estruturada em etapas sequenciais, visando a análise do estado atual do processo e a proposição de melhorias, conforme a Figura 2.

Figura 2 - Etapas da Pesquisa.

Fonte: Autores (2026).

Inicialmente, foi realizada a coleta de dados no ambiente produtivo, incluindo tempos de ciclo, tempos de espera, número de operadores e níveis de estoque em processo. Esses dados foram obtidos por meio de observação direta das operações e registrados para posterior análise.

Em seguida, foi elaborado o mapa do estado atual, representando o fluxo real do processo produtivo. A partir desse mapeamento, foram identificados gargalos, desperdícios e oportunidades de melhoria. Com base na análise realizada, foram propostas ações voltadas à melhoria do fluxo produtivo, incluindo a redução de tempos improdutivos, melhor balanceamento das operações e otimização do fluxo de materiais.

Por fim, foi desenvolvido o mapa do estado futuro, no qual foram incorporadas as melhorias propostas, permitindo a visualização dos ganhos potenciais em termos de produtividade, redução de *lead time* e eliminação de desperdícios.

A coleta de dados foi realizada diretamente no ambiente produtivo, com o objetivo de obter informações precisas sobre o desempenho das operações. Para cada etapa do processo, foram coletadas múltiplas amostras de tempo, garantindo representatividade dos dados e permitindo a análise da variabilidade dos processos.

Os dados coletados foram organizados e analisados com o auxílio de planilhas eletrônicas, possibilitando o cálculo de indicadores relevantes, como tempos médios, lead time e capacidade produtiva. A análise dos dados foi conduzida com base no *VSM*, permitindo identificar ineficiências, gargalos e oportunidades de melhoria ao longo do processo produtivo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. ANÁLISE DO ESTADO ATUAL

A partir da coleta de dados realizada no ambiente produtivo, foram levantadas informações referentes aos tempos de ciclo, tempos de espera, tempos de processo e tempos de abastecimento para cada posto de trabalho.

A análise dos dados evidenciou grande variabilidade entre os postos, com destaque para os postos D, E e G, que apresentaram tempos de ciclo significativamente elevados em comparação aos demais.

O Posto A apresentou tempo de ciclo médio de aproximadamente 2 horas e 14 minutos, sendo o abastecimento um dos principais fatores de impacto no desempenho. Já os postos B, C e F mostraram maior estabilidade e eficiência, com tempos de ciclo reduzidos e baixa variabilidade.

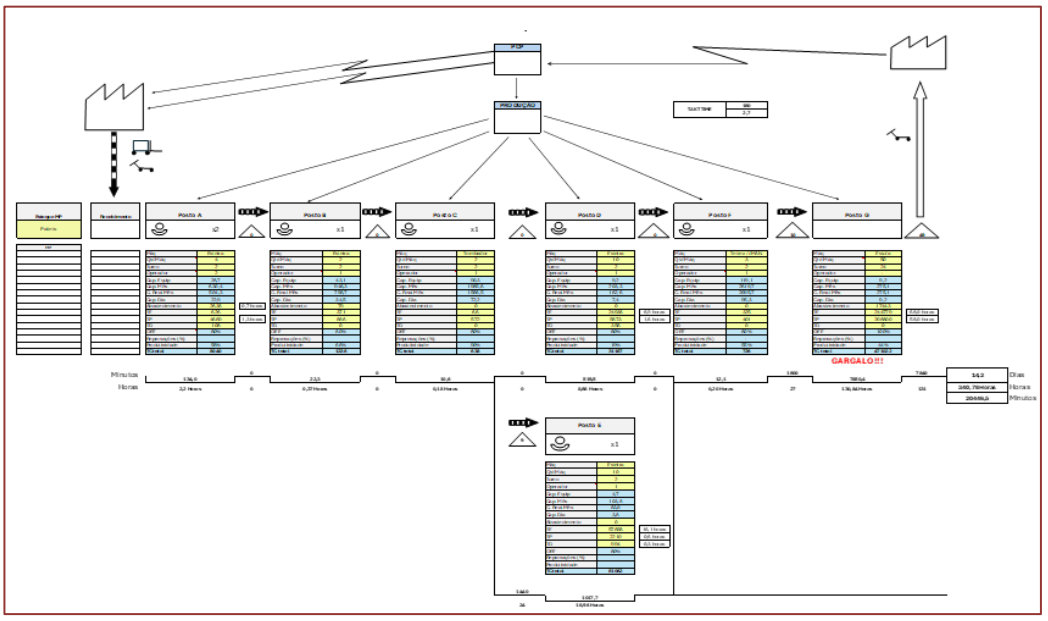
Por outro lado, os postos D e E apresentaram elevados tempos de espera, indicando grande ociosidade no sistema produtivo. No Posto D, o tempo médio de ciclo foi de aproximadamente 8 horas e 39 minutos, sendo que grande parte desse tempo corresponde a períodos de espera. Situação semelhante foi observada no Posto E, cujo tempo de ciclo médio ultrapassa 16 horas, com predominância de tempos não produtivos.

O Posto G apresentou o maior impacto no fluxo produtivo, com tempo de ciclo médio extremamente elevado, superior a 130 horas, caracterizando-se como o principal gargalo do processo. De forma geral, os resultados evidenciam um processo produtivo desbalanceado, com elevada presença de desperdícios, especialmente relacionados a tempos de espera e acúmulo de trabalho em processo (WIP).

3.1.1. MAPEAMENTO DO ESTADO ATUAL

Com base nos dados coletados, foi elaborado o mapa do estado atual do processo produtivo, permitindo a visualização integrada do fluxo de materiais e informações.

Figura 3 - Mapa do Estado Atual – *VSM* Atual.



Fonte: Autores (2026).

A Figura 3 apresentou o mapa do estado atual do processo produtivo. A análise do *VSM* evidenciou a existência de grandes estoques intermediários e interrupções no fluxo, refletindo um sistema predominantemente empurrado, com baixa sincronização entre as etapas produtivas. O *lead time* total do processo foi estimado em aproximadamente 14,2 dias, sendo que a maior parte desse tempo está associada a atividades que não agregam valor ao produto.

3.2. ANÁLISE DOS INDICADORES DO PROCESSO

A partir do mapeamento, foram calculados indicadores fundamentais para a análise do desempenho produtivo. O *Takt Time* do processo foi determinado em aproximadamente 2,6 horas por peça, considerando a demanda mensal e o tempo disponível de produção.

A comparação entre o *Takt Time* e os tempos de ciclo evidenciou que diversos postos operavam fora do ritmo necessário para atendimento da demanda, especialmente os postos D, E e G, reforçando a existência de gargalos no sistema.

Além disso, a análise da capacidade produtiva e da eficiência global (OEE) mostrou que, embora existisse capacidade instalada suficiente, a falta de balanceamento e a presença de desperdícios comprometiam o desempenho do processo.

3.3. PROPOSTAS DE MELHORIA

Com base na análise do estado atual, foram propostas ações voltadas à eliminação de desperdícios e à melhoria do fluxo produtivo.

As principais ações incluíram:

- Padronização do abastecimento de materiais;

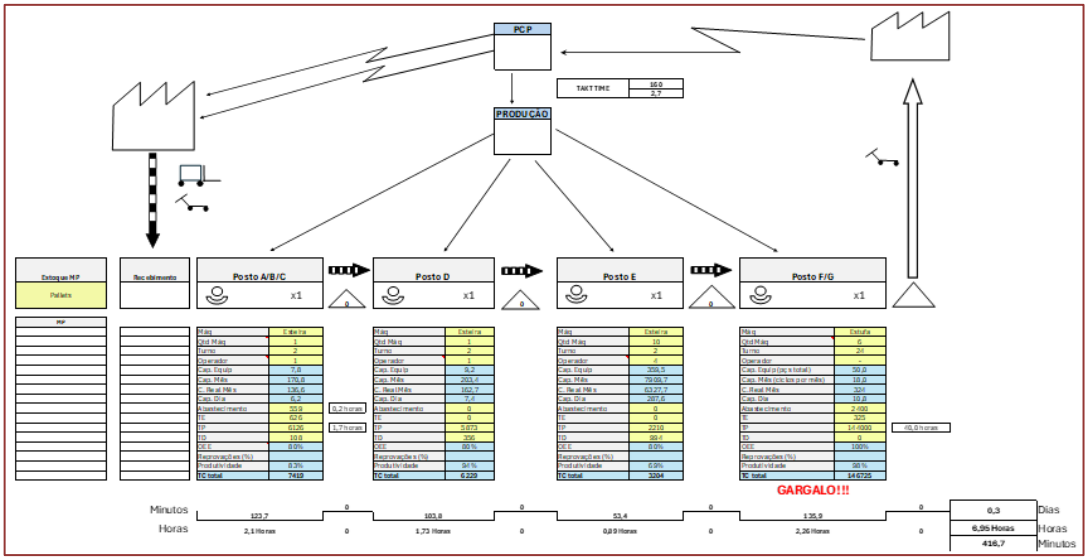
- Definição de responsáveis fixos para atividades críticas;
- Reorganização do *layout* produtivo;
- Balanceamento das operações;
- Implementação de melhorias no fluxo de informações.

Essas ações foram direcionadas principalmente aos postos A, D, E e G, que apresentaram maior impacto no desempenho global do sistema.

3.4. MAPEAMENTO DO ESTADO FUTURO

A partir da implementação das melhorias propostas, foi elaborado o mapa do estado futuro (Figura 4), representando um fluxo produtivo mais equilibrado e eficiente.

Figura 4 - Mapa do Estado Futuro – *VSM* Futuro.



Fonte: Autores (2026).

A Figura 4 apresentou o mapa do estado futuro do processo produtivo. O novo modelo proposto apresenta redução significativa dos tempos de espera, melhor balanceamento das operações e maior alinhamento entre capacidade produtiva e demanda. Destacam-se os seguintes resultados:

- Redução do *lead time* de 14,2 (Figura 3) dias para 0,3 dias (Figura 4);
- Redução do número de postos de trabalho de 7 para 4;
- Redução proporcional da necessidade de operadores, gerando economia de custos;
- Redução de aproximadamente:
  - 80% no tempo de ciclo do Posto D;
  - 95% no tempo de ciclo do Posto E;
  - 98% no tempo de ciclo do Posto G;

- Eliminação significativa de estoques intermediários (WIP);
- Alinhamento de todos os postos ao *Takt Time*.

Essas projeções de resultados demonstram que a aplicação do *VSM* foi eficaz na identificação de desperdícios e na proposição de ações para sua eliminação, podendo promover melhorias substanciais no fluxo produtivo.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve como objetivo aplicar o Mapeamento do Fluxo de Valor (*VSM*) em um processo produtivo industrial, com foco na identificação de desperdícios e na proposição de melhorias voltadas ao aumento da eficiência operacional. A aplicação da ferramenta permitiu a visualização integrada do fluxo produtivo, evidenciando problemas relacionados ao desbalanceamento entre operações, elevados tempos de ciclo, acúmulo de trabalho em processo (WIP) e desalinhamento em relação ao *Takt Time*. A partir dessa análise, foi possível propor melhorias direcionadas à otimização do fluxo e eliminação de desperdícios.

Os resultados obtidos, nesta experiência, sinalizam ganhos expressivos no desempenho do processo. O *lead time* total foi reduzido de 14,2 dias para 0,3 dia, representando uma redução de aproximadamente 97,8%. Além disso, o estoque em processo, anteriormente elevado, foi reduzido para níveis próximos de zero, contribuindo para a diminuição do tempo de atravessamento e do capital imobilizado.

O balanceamento das operações possibilitou, em sua análise, a redução do número de postos de trabalho de sete para quatro, com consequente diminuição do número de operadores e economia estimada de custos. Adicionalmente, foram observadas reduções significativas nos tempos de ciclo de postos críticos, com ganhos aproximados de 80%, 95% e 98%, evidenciando o impacto das melhorias propostas.

Dessa forma, verificou-se nesse caso que o *VSM* se mostrou uma ferramenta eficaz para a análise e melhoria de processos produtivos, permitindo prospectar ganhos relevantes em termos de eficiência, produtividade e organização do fluxo de valor.

Como continuidade deste estudo, recomenda-se a implementação prática das melhorias propostas, possibilitando a validação dos resultados projetados em ambiente real, bem como a realização de análises complementares para aprofundamento das soluções adotadas e sustentação dos ganhos obtidos ao longo do tempo.

REFERÊNCIAS

[1] ARAÚJO, Larissa Trindade de; BOTINELLY, Thiago Híspere Moreira; LUZ, Iremar Bezerra da. ***Otimização do processo produtivo através da aplicação da ferramenta de PCP – uma análise em empresas de pequeno porte***. s.l.: s.n., 2018.

[2] CHIAVENATO, I. ***Iniciação ao Planejamento e Controle da Produção***. Ed. 5. São Paulo: Atlas, 2022.

[3] CORRÊA, H. L.; CORRÊA, C. A. ***Administração da produção e operações: manufatura e serviços: uma abordagem estratégica***. Ed. 4. São Paulo: Atlas, 2017.

[4] KRÜGER, Roselini Trapp. ***Melhoria na gestão da capacidade produtiva através da aplicação das ferramentas OEE e UEP nos processos industriais***. Monografia (Especialização em Engenharia de Produção) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2015.

[5] MARTINS, P. G.; LAUGENI, F. P. ***Administração da produção***. 2. ed. São Paulo: Saraiva, 2006.

[6] OHNO, Taiichi. ***O Sistema Toyota de Produção: além da produção em larga escala.*** Porto Alegre: Bookman, 1997.

[7] PEREIRA, Rafael Morais et al. ***Administração de produção e operações: evolução, conceito e interdisciplinaridade com as demais áreas funcionais***. Universidade Federal de Viçosa; Universidade Federal de Lavras, 2015.

[8] RAMOS, André Luiz; CÂNDIDO, Guilherme Junqueira; ESTENDER, Antônio Carlos**. *A importância do planejamento e controle de produção***. Revista Digital de Gestão e Negócios, 2019.

[9] ROTHER, M.; SHOOK, J. ***Aprendendo a Enxergar: Mapeando o Fluxo de Valor para Agregar Valor e Eliminar o Desperdício***. São Paulo: Lean Institute Brasil, 2003.

[10] SANTOS, Murilo Mantovan; DAMY-BENEDETTI, Patrícia de Carvalho. ***Sistemas e métodos de gerenciamento na busca incessante pela melhoria contínua e excelência operacional***. Revista UNILAGO, São José do Rio Preto, 2021.

[11] SINGH, B.; GARG, S. K.; SHARMA, S. K.; GREWAL, C. ***Lean implementation and its benefits to production industry***. International Journal of Lean Six Sigma, v. 1, n. 2, p. 157–168, 2010.

[12] SLACK, Nigel; BRANDON-JONES, Alistair; JOHNSTON, Robert. ***Princípios de administração da produção***. São Paulo: Atlas, 2013.

[13] WERKEMA, Cristina. ***Lean Seis Sigma - introdução às ferramentas do Lean Manufacturing***. 2. ed. Rio de Janeiro: Atlas, 2011.

[14] WOMACK, James P.; JONES, Daniel T. ***A mentalidade enxuta nas empresas: elimine o desperdício e crie riqueza***. Rio de Janeiro: Elsevier-Campus, 2004.

Autores

AUTORES

ALINE MARA OLIVEIRA (ORGANIZADORA)

Possui graduação em Engenharia de Controle e Automação pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (2012). Pós Graduada em Gestão de Projetos (FGV 2014-5015). Ministrou aulas no Centro Universitário do Planalto de Araxá(2015-2016) e no CEFET-MG nos cursos de graduação e técnicos. Tem experiência na área de Automação Industrial, Engenharia Elétrica, atuando principalmente nos seguintes temas: redes industriais, proteção de sistemas elétricos, IEC-61850, automação, instrumentação, sistemas de controle, equacionamento de controladores, sistemas multivariáveis e teoria de controle. Trabalhou na indústria no setor de projetos industrias no período de 2007 a 2015. Mestre pela Universidade Federal de Uberlândia. (2017-2019). Atualmente doutoranda no curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia.(2019-2023)

OSVALDO SENA GUIMARÃES (ORGANIZADOR)

Graduação em Engenharia Civil pela Escola de Engenharia Kennedy (1983), Ênfase em Engenharia de Transportes EEK (1983), Análise De Sistemas - UFMG(1985), Especialização em Gestão de Projetos de Engenharia IEC/PUC (2012), Mestrado em Estratégia FEAD (2005). Professor do curso de Engenharia Civil da Universidade do Estado de Minas Gerais (2015-2017 Divinópolis). Professor na Faculdade Senac Minas. Atua na área de ensino superior desde 1988 como Professor, Coordenador de Curso, Coordenador de Extensão, Coordenador de Iniciação Científica e de Pré-incubadora de base Tecnológica. Atua na área de Engenharia, Computação e Projetos desde 1984.

BERENICE DE OLIVEIRA BONA

Doutora em Ensino de Ciências - Universidade de Burgos - Espanha

CLAUDIO TAVARES

Bacharel em Economia Universidade do Estado do Rio de Janeiro

GABRIELA GOES MERCEDES

Bacharel em Defesa e Gestão Estratégica - Universidade do Estado do Rio de Janeiro

HUGO PIMENTEL TAVARES

Mestre em Engenharia de Produção/Doutorando em Engenharia Ambiental Universidade do Estado do Rio de Janeiro

LEANDRO DE OLIVEIRA

Graduado em Sistemas de Informação

LUANA ELLEN DA SILVA SANTOS

Bacharel em Engenharia Mecânica Universidade do Estado do Rio de Janeiro

MATHEUS BONA5

Cursando Ciências de Computação -PUC-RS

NILO ANTÔNIO DE SOUZA SAMPAIO

Doutor em Engenharia Mecânica Universidade do Estado do Rio de Janeiro

AUTORES

RÔMULO IVAN COUTO MANSO

Bacharel em Economia

TIAGO HENRIQUE BONA

MBA em Gestão Internacional de Projetos

YÚRIKA WAKIGAMA DAMACENO

Bacharel em Engenharia de Produção

www.poisson.com.br
contato@poisson.com.br

@editorapoisson

https://www.facebook.com/editorapoisson